

**Б.Б.Луганцев, Б.А.Ошеров**

**Регулируемый привод исполнительного  
органа струговой установки**

Рецензент:

Доктор технических наук, профессор кафедры Строительство и  
техносферная безопасность Шахтинского института (филиала) ЮРГПУ  
(НПИ) им. М.И.Платова

**Турук Юрий Владимирович.**

**Луганцев Б. Б., Ошеров Б.А..**

Л Регулируемый привод исполнительного органа струговой установки:  
монография / Б. Б. Луганцев, Ошеров Б.А. – Новочеркасск: ЮРГПУ  
(НПИ), 2017. – 123с.: ил.

ISBN

В настоящей монографии приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований специалистов Шахтинского научно-исследовательского и проектно-конструкторского угольного института (ШахтНИУИ) в области создания регулируемого привода исполнительного органа струговой установки на базе двигателей постоянного тока и частотного регулирования асинхронными электродвигателями.

При написании монографии авторы использовали материалы научных отчетов ШахтНИУИ.

Монография предназначена для инженерно-технических работников угольных предприятий. Она может быть использована аспирантами и студентами горных университетов и институтов.

ISBN

© Луганцев Б. Б., Ошеров Б.А.,2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1.Средства защиты привода.....	8
2.Исследование режимов работы привода исполнительного органа струговой установки.....	11
2.1.Определение параметров, влияющих на нагрузки привода.....	11
2.2. Пусковые процессы привода .....	16
3.Математическое моделирование нагруженности механической системы привода исполнительного органа.....	22
3.1. Математическая модель механической системы привода.....	25
3.2. Оценка достоверности математической модели.....	32
4.Исследование нагрузок при стопорении исполнительного органа.....	39
4.1. Основные допущения, принимаемые при исследовании нагрузок.....	39
4.2. Уравнения движения механической системы при стопорении исполнительного органа.....	40
4.3. Экспериментальные исследования при стопорении одноприводной системы.....	47
4.4. Экспериментальные исследования при стопорении двухприводной системы.....	52
4.5. Исследование экстремальных нагрузок на ЭВМ.....	53
5.Создание и исследование регулируемого привода исполнительного органа.....	66
5.1.Основные предпосылки создания регулируемого привода .....	66
5.2.Создание частотно-регулируемого привода.....	67
5.2.1.Исследование работы привода с системой авторегулирования с общим каналом регулирования частоты и разделенными каналами регулирования напряжений.....	68

5.2.2. Исследование работы привода с системой авторегулирования с разделенными каналами регулирования частот и напряжений.....	71
5.2.3. Исследование работы серийного электродвигателя в режиме стопорения.....	73
5.2.4. Стендовые исследования макетного образца частотно-регулируемого привода.....	77
5.2.5. Стендовые исследования частотно-регулируемого привода струговой установки.....	82
5.3. Создание регулируемого привода постоянного тока.....	86
5.3.1. Основные технические данные станции управления.....	87
5.3.2. Стендовые исследования привода .....	90
5.3.3. Шахтные исследования струговой установки с приводами постоянного тока.....	95
6. Расчет мощности привода исполнительного органа.....	112
Заключение.....	122

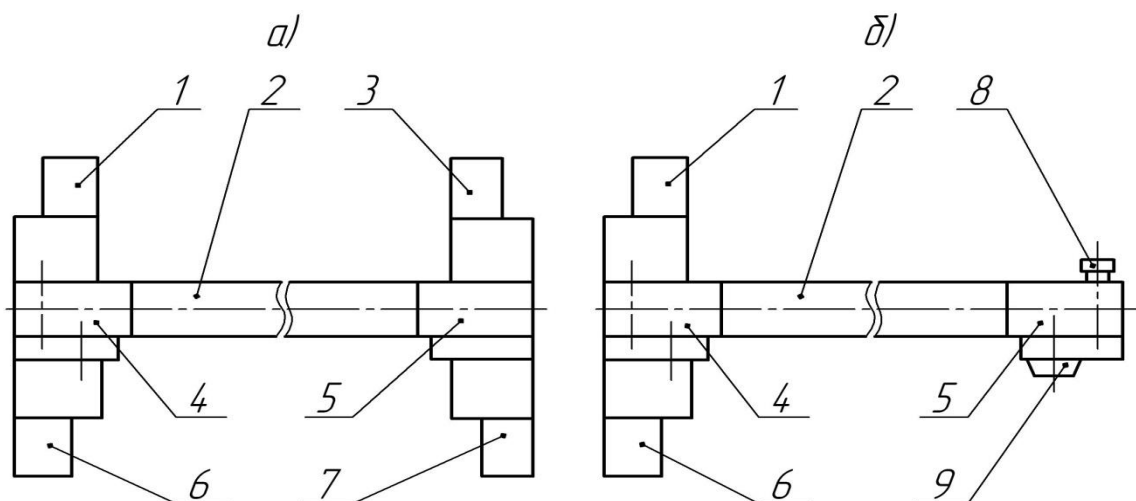
## Предисловие

Струговые установки, как правило, оснащаются двумя приводами исполнительного органа и двумя приводами конвейера. Приводы исполнительного органа служат для его перемещения вдоль забоя, а приводы конвейера - для перемещения скребковой цепи конвейера.

Один привод исполнительного органа и один привод конвейера, установленные на раме конвейера, образуют приводную станцию.

Приводная станция, в направлении которой приводится транспортирование угля из забоя, называется головной, а вторая - концевой. При отработке пологих и наклонных пластов по простиранию головную приводную станцию чаще называют нижней, а концевую - верхней.

При выемке выбросоопасных пластов или при работе в лавах длиной до 150 м по простиранию пласта, возможно использование одной приводной станции. В этом случае вместо отсутствующего привода исполнительного органа устанавливается обводная головка, а вместо отсутствующего привода конвейера - специальная опора.



**Рис. 1. – Варианты сборок струговых установок: а) с двумя приводными станциями; б) с одной приводной станцией**

1, 3 – приводы конвейера; 2 – средняя часть конвейера; 4, 5 – рамы конвейера; 6, 7 – приводы исполнительного органа; 8 – опора; 9 – обводная головка

На рис.1 схематично представлены варианты сборок струговых установок в зависимости от количества приводных станций.

Приводы исполнительных органов должны обеспечивать:

- расчетные силовые (мощность, крутящий момент) и скоростные характеристики (повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками);

- высокие показатели безопасности, надежности и ремонтпригодности;

- рациональные энергетические и механические характеристики, высокий коэффициент полезного действия;

- высокие кратности пускового  $M_{п}$  и максимального  $M_{max}$  моментов по отношению к номинальному  $M_{ном}$  ( $M_{п}/M_{ном} \geq 2$ ;  $M_{max}/M_{ном} \geq 2,5$ ).

- возможность осуществлять выбор скоростных режимов работы струговой установки (опережающий или отстающий) в конкретных условиях эксплуатации;

- возможность равномерной загрузки головного и концевого приводов;

- охлаждение редукторов и приводных электродвигателей;

- температурную защиту обмоток электродвигателей от перегрева;

- снижение динамических нагрузок, защиту элементов и узлов привода от поломок, а тяговых цепей от разрыва при недопустимых перегрузках;

- минимально возможные габариты, особенно по высоте;

- возможность расположения как в лаве, так и в прилегающих к лаве горных выработках.

В струговых установках обычно применяется электрический привод, состоящий из рудничного взрывозащищенного одно - или двухскоростного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, соединительной и (или) предохранительной муфты, цилиндрического или цилиндро-конического редуктора. Приводы, как правило, имеют приспособления для натяжения цепи и могут оснащаться коробками скоростей. Коробки скоростей обычно входят в состав редукторов. В состав

привода исполнительного органа могут входить звезда, промежуточная рама и кронштейн с цепесьёмником. Промежуточная рама служит для крепления привода исполнительного органа и для размещения звезды. Кронштейн с цепесьёмником устанавливается на промежуточной раме и обеспечивает плавный сход цепи со звезды.

Двигатели, как правило, имеют водяное охлаждение, а также встроенную температурную защиту обмоток от перегрева.

Редукторы предназначены для увеличения крутящих моментов электродвигателей и получения необходимых скоростей движения исполнительного органа и скребковой цепи конвейера в зависимости от передаточного числа и диаметра приводной звезды.

Следует отметить, что режимы работы приводов струговых конвейеров аналогичны режимам работы приводов конвейеров в комбайновых лавах, поэтому в данной работе не рассматриваются.

Авторы выражают признательность Л.И. Файнбурду, В.В.Сойферу за помощь в подготовке материалов для монографии и Г.А. Сотниковой за помощь в подготовке монографии.

## 1. Средства защиты привода

Средства защиты могут выполняться с использованием электрических и механических способов и должны обеспечивать:

защиту трансмиссии, с учетом загрузки приводов, независимо от местоположения исполнительного органа,

защиту приводов и трансмиссии на различных скоростях движения исполнительного органа,

исключение ложных срабатываний при пусках.

Для защиты привода от поломок при недопустимых перегрузках применяются гидромуфты, упругие муфты, муфты со срезным элементом, многодисковые фрикционные муфты.

Гидромуфты относятся к гидродинамическим передачам и помимо защитных функций обеспечивают плавный пуск односкоростных электродвигателей и рациональное распределение нагрузок между приводами в двухприводной системе.

Упругие муфты также снижают влияние экстремальных нагрузок, возникающих при работе струговых установок.

В муфтах со срезным элементом при возникновении на выходном валу редуктора момента, предельно допустимого для привода, элемент срезается. При этом передача вращающего момента от двигателя на вал звезды прекращается. Работа возобновляется после замены срезного элемента.

Многодисковая фрикционная муфта МПМ2 представлена на рис.2.

Муфта состоит из следующих основных частей: блока пружин 1, корпуса 2, втулки 3, пакета дисков 4, устройства отключения 7, кулачковой муфты 8 и крепежных деталей.

Корпус 2 устанавливается на полом вала 5, а втулка 3 - на валу звезды 6. Пакет дисков 4 состоит из стальных дисков, имеющих с обеих сторон фрикционные накладки из специального материала, и стальных дисков без накладок. Оба типа дисков расположены в пакете с чередованием, образуя

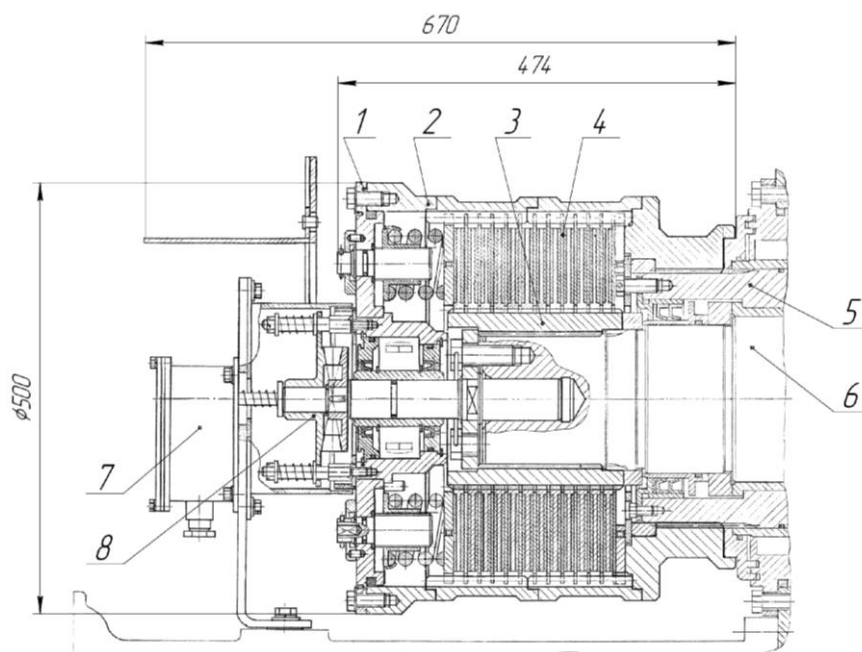


пары трения. Диски с фрикционными накладками имеют сцепление с втулкой 3, а диски без накладок с корпусом 2.

Принцип работы муфты заключается в следующем.

Передача момента от полого вала 5 к валу звезды 6 происходит за счёт сил трения, возникающих при сжатии пакета дисков 4 с помощью блока пружин 1.

Величина момента зависит от усилия сжатия, создаваемого винтовыми пружинами. Сжатие пружин производится с помощью динамометрического ключа, входящего в комплект поставки струговой установки, путём вращения специальных винтов, расположенных на торцевой поверхности блока пружин. Зависимость между моментом затяжки винтов и предельными значениями моментов, передаваемых муфтой, устанавливается на заводе-изготовителе муфт или приводов.



**Рис. 2 - Муфта предельного момента МПМ2**

1 – блок пружин; 2 – корпус; 3 – втулка; 4 – пакет дисков; 5 – полый вал; 6 – вал звезды; 7 – устройство отключения; 8 – кулачковая муфта

При превышении в процессе работы величины предельного момента, на который настроена муфта, пары трения в пакете дисков начинают

проскальзывать. Во время проскальзывания происходит снижение пиковых нагрузок на элементы привода.

Контролируемый угол поворота пар трения задаётся конструкцией кулачковой муфты 8 и составляет от  $20^\circ$  до  $120^\circ$ . При достижении заданного значения угла поворота пар трения кулачковая муфта расцепляется и перемещает магнит в устройстве отключения 7, что приводит к переключению магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов), расположенных в этом же устройстве, и затем к отключению приводных электродвигателей.

При остановке полого вала под воздействием пружин кулачковая муфта вновь сцепляется, а магнит в устройстве отключения занимает первоначальное положение. Через 2-6 с после отключения двигателей автоматически происходит восстановление готовности электрической схемы струговой установки к следующему пуску.

Для защиты трансмиссии от перегрузок может быть использован регулируемый привод. Вопросам создания регулируемого привода исполнительного органа струговой установки посвящено дальнейшее изложение.

## **2. Исследования режимов работы привода исполнительного органа струговой установки**

### **2.1. Определение параметров, влияющих на нагрузки привода**

Усилие в рабочей ветви тяговой цепи исполнительного органа, на отдельных участках его перемещения, в общем случае выражается стационарной случайной функцией. Основными составляющими спектральной плотности нагрузок в тяговой цепи является низкочастотная и высокочастотная составляющие. Низкочастотная составляющая усилия в тяговой цепи связана с макроизменениями прочностных свойств разрушаемого исполнительным органом угольного забоя, а высокочастотная составляющая обусловлена автоколебательным характером движения исполнительного органа.

Динамические нагрузки в трансмиссии исполнительного органа в первую очередь определяются динамикой движения системы "исполнительный орган - основная ветвь цепи - головной привод". Электромагнитная система электродвигателя способствует демпфированию механических колебаний привода, снижает их амплитуду и, следовательно, уровень динамических нагрузок в системе в целом. Динамическая система "исполнительный орган - основная ветвь цепи" является автоколебательной. В этой системе автоколебания можно рассматривать как вынужденные, поддерживаемые внешней возмущающей нагрузкой, вид которой определяется самой динамической системой. В этом случае внешнюю возмущающую нагрузку можно считать известной, так как препятствующие движению исполнительного органа силы резания и трения могут быть рассчитаны по известным методикам.

Распределение нагрузки между электродвигателями диктуется, во-первых, динамическими свойствами присущими самой системе стругового исполнительного органа, а во-вторых различием характеристик элементов входящих в трансмиссию, причем если в первом случае величина нагрузки каждого электродвигателя зависит от направления движения, то во втором

не зависит и определяется значимостью различия характеристик элементов трансмиссии. Для выявления параметров, которые могут оказать влияние на режим нагружения, представим механическую систему привода исполнительного органа системой уравнений, в которой изменение момента сил сопротивлений на валу электродвигателя головного привода выражена следующей зависимостью:

$$M_{y1}(t) = M_c + M_1 \sin \omega t, \quad (2.1)$$

где  $M_c$  - среднее значение момента сил сопротивлений,

$M_1$  - амплитуда колебаний низкочастотной составляющей момента сил сопротивлений,

$\omega$  - угловая частота колебаний низкочастотной составляющей момента сил сопротивлений

Для установления параметров, оказывающих влияние на распределение нагрузок между электродвигателями приводов исполнительного органа, рассмотрим закономерности формирования нагрузок головного и концевого приводов в зависимости от значения параметров электромеханических характеристик и их различия. Представим механические характеристики электродвигателей головного и концевого приводов на рабочем участке следующими зависимостями:

$$M_{дв1} = \Delta M + kS_1; \quad (2.2)$$

$$M_{дв2} \cong kS_2,$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - скольжения соответственно головного и концевого электродвигателей,

$\Delta M$  - величина разности моментов электродвигателей по их механическим характеристикам.

Такое задание вида механической характеристики позволяет получить параллельные участки рабочих частей с возможностью задания различных величин разбросов по скольжению, тогда:

$$k = \frac{M_{кр}}{S_{кр}},$$

где  $M_{кр}, S_{кр}$  –соответственно критические значения момента и скольжения электродвигателя.

Кроме того, такое задание механических характеристик позволяет рассмотреть случай, когда на одном из приводов скорость перемещения тяговой цепи больше, чем на другом. Это может быть вызвано различием передаточных чисел редукторов вследствие ошибок при проектировании или недостаточной точности их изготовления, различием диаметров приводных звезд вследствие неравномерности их износа или замены, а также различие шагов звеньев цепи на отдельных ее участках. В общем случае, с учетом ранее оговоренных допущений, уравнение движения приводов исполнительного органа имеет вид:

$$J \frac{d\omega_1}{dt} = M_{дв1} - M_y; \quad (2.3)$$

$$J \frac{d\omega_2}{dt} = M_{дв2} + M_y - M_c - M_1 \sin \omega t,$$

где  $J$  - момент инерции вращающихся элементов привода исполнительного органа,

$M_y$  - момент сил упругих деформаций во вспомогательной ветви цепи,

$M_c$  - среднее значение момента сил сопротивлений на исполнительном органе,

$M_1$  - амплитуда момента сил сопротивлений низкочастотной составляющей процесса резания угля.

Учитывая выражение (2.1) и (2.2) можно представить:

$$J\omega_0 \frac{dS_1}{dt} = -\Delta M - kS_1 + M_y; \quad (2.4)$$

$$J\omega_0 \frac{dS_2}{dt} = -kS_2 - M_y + M_c + M_1 \sin \omega t_1.$$

Решая систему уравнений (2.3) относительно  $M_y$  и учитывая, что

$$\frac{dM_y}{dt} = c\omega_0(S_2 - S_1),$$

где  $c$  - коэффициент жесткости вспомогательной ветви цепи, имеем

$$\frac{d^2M_y}{dt^2} + \frac{k}{J\omega_0} \frac{dM_y}{dt} + \frac{2c}{J} M_y = \frac{c}{J} (\Delta M + M_c + M_1 \sin \omega t).$$

В операторной форме записи с учетом обозначений  $\frac{k}{J\omega_0} = a$ ;  $\frac{2c}{J} = b$ ;

$$\frac{c}{J} (\Delta M + M_c) = m; \quad \frac{c}{J} M_1 = m_1;$$

уравнение запишем следующим образом:

$$p^2 M_y + ap M_y + b M_y = m + m_1 \sin \omega t \quad (2.5)$$

Характеристическое уравнение

$$p^2 + ap + b = 0.$$

Корни характеристического уравнения

$$\alpha_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}.$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения (2.5) имеет

вид

$$M_y(t) = c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t} \frac{m}{b} + \frac{m_1}{(b - \omega^2)^2 + a^2 + \omega^2} [(b - \omega^2) \sin \omega t - a \omega \cos \omega t]. \quad (2.6)$$

Значения  $c_1$  и  $c_2$  определяются при  $t = 0$ , с учетом следующих значений начальных условий:

$$M_y(t) = M_y(0) = M_B; \quad \frac{dM_y}{dt} = -c\omega_0(S_2(0) - S_1(0)) = -c\omega_0 \Delta S.$$

$$t = 0$$

из системы уравнений

$$\begin{cases} M_B = c_1 + c_2 + \frac{m}{b} - \frac{m_1 a \omega}{(b - \omega^2)^2 + a^2 + \omega^2}; \\ -c\omega_0 \Delta S = \alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2 + \frac{m(b - \omega^2)\omega}{(b - \omega^2)^2 + a^2 + \omega^2}. \end{cases}$$

Анализ значений  $c_1$  и  $c_2$  и возможного диапазона изменений входящих в них параметров показал, что значимым является только выражение

$$c_1 = \left[ \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} (M_B - \frac{\Delta M + M_c}{2}) + \frac{c\omega_0 \Delta S}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] e^{\alpha_1 t},$$

тогда уравнение (2.6) запишется

$$M_y(t) = \left[ \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} (M_B - \frac{\Delta M + M_c}{2}) + \frac{c\omega_0 \Delta S}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] e^{\alpha_1 t} + \frac{\Delta M + M_c}{2} +$$

$$+ J \left[ \frac{cM_1}{\left( \frac{2c}{J} + \omega^2 \right)^2 + \left( \frac{M_{кр}}{S_{кр} J \omega} \right)^2 \omega^2} \right] \cdot \left[ \left( \frac{2c}{J} - \omega^2 \right) \sin \omega t - \frac{M_{кр} \omega}{S_{кр} J \omega_0} \cos \omega t \right].$$

Таким образом основными параметрами, определяющими режим нагружения приводов исполнительного органа, являются: величина момента сопротивления на исполнительном органе, уровни загрузки приводов, жесткость тягового органа, различие скольжений электродвигателей, значения параметров их механических характеристик, момента инерции вращающихся элементов привода. Следует установить влияние как самих параметров, так и их допустимого диапазона разброса. В асинхронных электродвигателях допускается различие в номинальных скольжениях до 20 %, при этом для жестко связанных электродвигателей наибольший возможный разброс скольжения  $S_1=1,2$ ;  $S_2=0,8$ , а нагрузки распределяются в соотношении 1:1,5. По данным статистической обработки контрольных испытаний взрывобезопасных электродвигателей установлено, что отклонение скольжений от среднего значения с вероятностью 0,997 не более 12%, при этом нагрузки в жестко связанном двухдвигательном приводе распределяется в соотношении 1:1,27.

## 2.2. Пусковые процессы привода

Возникающие в начале переходных процессов пики моментов могут при пуске в 3-5 раз, а при реверсе в 12-18 раз превысить номинальные моменты. Именно, эти процессы определяют надежность работы привода. Пуск привода исполнительного органа в условиях эксплуатации может происходить как при наличии сил внешних сопротивлений, так и на холостом ходу. Характерным в процессе пуска является одновременность включения приводов, причем первым обычно включается вспомогательный привод. В этих условиях формирование процесса пуска в трансмиссии конечного привода, до включения головного, можно описать следующей системой уравнений

$$J \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = \frac{M_{кр} + M_{п}}{2} \left( \frac{U_1}{U_n} \right)^2 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2); \quad (2.7)$$
$$J \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = c_1 (\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $J$  - момент инерции вращающихся элементов привода,

$\varphi_1; \varphi_2$  - углы поворотов валов электродвигателей.

$U_1; U_n$  - соответственно напряжение при пуске и номинальное напряжение электродвигателя,

$M_{п}; M_{кр}$  - пусковой и критические моменты электродвигателя.

Тогда решение системы (2.7) дает следующую зависимость момента сил упругих деформаций во вспомогательной ветви при пуске,

$$M_y(t) = \frac{M_{кр} + M_{п}}{2} \left( 1 - \cos \sqrt{\frac{2c_1}{J}} \cdot t \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right),$$

а максимальное значение момента в зависимости от выдержки времени между включениями электродвигателей соответственно равно

$$M_{y1} \max (t = \Delta t) = \frac{M_{кр} + M_{п}}{2} \left( 1 - \cos \sqrt{\frac{2c_1}{J}} \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right) :$$



Наибольшее значение момента при условии, что  $M_{\pi} = \text{const} = \frac{M_{\text{кр}} + M_{\pi}}{2}$ .

наступит при  $\cos \sqrt{\frac{2c_1}{J}} \cdot t = -1$ ;  $\sqrt{\frac{2c_1}{J}} \cdot t = \pi$ ;

т.е. при  $t_1 = \Delta t = \frac{\pi}{\sqrt{2c_1/J}}$ .

Таким образом, если запуск будет осуществляться с  $M_{\pi} = \text{const}$ , то необходимо исходя из допустимой величины момента  $M_y(t)$  длительности процесса и тепловых потерь установить рациональную выдержку времени ( $\Delta t$ ) включения головного привода, которая определяется, в основном, длиной струговой установки и скоростью движения исполнительного органа. После включения головного привода дальнейшее движение системы привода описывается следующими уравнениями:

$$J \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = M_{\text{дв}} + M_{\text{в}} - c_2 (\varphi_2 - \varphi_3);$$

$$J_1 \frac{d^2 \varphi_3}{dt^2} = c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) - M_{\text{ст}};$$

где  $J_1$  - момент инерции исполнительного органа, приведенный к валу электродвигателя;

$M_{\text{дв}}$  - момент концевого двигателя на момент включения головного;

$c_2$  - коэффициент жесткости основной ветви цепи

$M_{\text{ст}}$  - момент сил сопротивления на исполнительном органе.

Решение этой системы уравнений дает следующую зависимость для момента сил упругих деформаций в основной ветви цепи

$$M_{y2}(t) = \frac{J_1 \cdot \left( \frac{M_{\pi} + M_{\text{кр}}}{2} + M_{\text{в}} \right) + JM_{\text{ст}}}{J_1 + J} \left( 1 - \cos \sqrt{\frac{c_2(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}} \cdot t \right),$$

Максимум момента наступит при

$$\cos \sqrt{\frac{c_2(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}} \cdot t = -1; \quad t_2 = \frac{\pi}{\frac{2c(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}}$$

и равен:

$$M_{y2 \max} = \frac{2(J \cdot (\frac{M_{\pi} + M_{\text{кр}}}{2} + M_{\text{в}}) + J \cdot M_{\text{ст}})}{J + J_1} (1 - \cos \sqrt{\frac{c_2(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}} \cdot t).$$

Таким образом, получены зависимости для анализа формирования переходного процесса пуска привода исполнительного органа и построения на этой основе системы управления, обеспечивающей минимальные значения перегрузок и тепловых потерь в приводе. Из представленных зависимостей следует, что наибольшее значение момента при пуске зависит от величин  $M_{\text{кр}}$ ,  $M_{\pi}$ , моментов инерции исполнительного органа и вращающихся элементов привода. Время наступления максимальной нагрузки во вспомогательной ветви цепи определяется частотой колебаний концевой привода, а в основной ветви - частотой колебаний системы "головного привод - основная ветвь цепи - исполнительный орган". Причем время достижения максимума момента во вспомогательной ветви цепи больше, чем в основной. Отношение их определяется по формуле:

$$t_{\text{отн}} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\pi}{\sqrt{2c_1/J}} : \frac{\pi}{\frac{c_2(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}} = \frac{\sqrt{\frac{c_2(J_1 + J)}{J_1 \cdot J}}}{\sqrt{\frac{2c_1}{J}}} = \sqrt{\frac{c_2(J_1 + J)}{2c_1 \cdot J_1}}.$$

Полученное соотношение ( $t_{\text{отн}}$ ) показывает, что скорость нарастания нагрузок во вспомогательной ветви при пуске меньше, чем в основной, причем для современных приводов струговых установок в зависимости от местоположения исполнительного органа это отношение изменяется в пределах от 2 до 10, меньшее значение - при расположении исполнительного органа в начале лавы, больше - в конце. Следовательно, при разработке системы уравнения необходимо предусмотреть увязку скорости формирования процесса пуска с местоположением исполнительного органа в лаве для обеспечения оптимальных условий распределения нагрузок между электродвигателями при пуске и выходе на стационарный режим работы. Для

установления энергетических характеристик пусковых процессов электродвигателей проведено математическое моделирование этих процессов.

В таблице 2.1 приведены значения длительности выдержки времени между включениями электродвигателей ( $\Delta t$ ), время пуска головного ( $t_2$ ) и концевого ( $t_1$ ) приводов, эквивалентные значения их токов при пуске ( $I_{\Sigma 2}$  и  $I_{\Sigma 1}$ ), а также в течение 5с после пуска  $I_{\Sigma 2}$ .

Таблица 2.1.

### Параметры пускового процесса привода

$\Delta t, \text{с}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$I_{\Sigma 1, \Lambda}$	$I_{\Sigma 2, \Lambda}$	$Y'_{\Sigma 1, \Lambda}$	$Y'_{\Sigma 2, \Lambda}$	$d_1$	$d_2$
0	0,2	0,2	736	611	44,0	213,8	0,45	2,25
0,2	0,2	0,15	741	594	76,2	114,8	0,802	1,208
0,3	0,2	0,2	741	440	102,3	89,2	1,076	0,939
0,5	0,2	0,1	741	415	167,5	75,2	1,763	0,792

Из таблицы 2.1 следует, что длительность пуска концевого электродвигателя ( $t_1$ ) и головного электродвигателя ( $t_2$ ), а также величина эквивалентного тока в конечном электродвигателе ( $I_{\Sigma 1}$ ) практически не зависят от выдержки времени ( $\Delta t$ ). Для головного электродвигателя характерно уменьшение эквивалентного значения тока ( $I_{\Sigma 2}$ ) по мере роста выдержки времени ( $\Delta t$ ). Объясняется это тем, что запуск головного электродвигателя осуществляется на вращающийся ротор, имеющий большее электрическое сопротивление. Из представленных данных следует, что существует рациональная выдержка времени между включениями приводов, увеличение или уменьшение ее величины приводит к росту тепловых потерь до 2,5 раз. Установлено, что на максимальную величину нагрузки при пуске фактически оказывают влияние только жесткость цепи и момент сопротивления на исполнительном органе. Величина нагруженности приводов исполнительного органа существенно зависит от различия

номинальных значений скольжений электродвигателей, причем характер нагруженности зависит от того, головной это электродвигатель или концевой. Так, если электродвигатель работает с большим скольжением, то при  $\Delta t = 0,3\text{с}$  перегрузка головного электродвигателя на 30 % наступает через 5 с после пуска. Если концевой электродвигатель имеет меньшее скольжение, то головной электродвигатель сразу с начала пуска перегружается на 50 %.

Анализ влияния падения напряжения в кабельной сети на формирование нагруженности привода при пуске показал, что при прочих равных условиях длительность выравнивания нагрузок увеличивается незначительно (порядка 10%) и практически не зависит от направления движения исполнительного органа. Моделированием процесса пуска установлено, что увеличение постоянной составляющей момента сопротивления на исполнительном органе в 1,5 раза способствовало уменьшению амплитуды колебаний усилий в основной ветви тяговой цепи в 3,8 раза. Следовательно, увеличение диссипативных потерь, например использование демпферов, позволяет существенно снизить динамику процесса и повысить долговечность трансмиссии. Установлено, что при применении газогидравлического демпфера срок службы тяговой цепи исполнительного органа струговой установки повышается в 1,7 раза за счет уменьшения амплитуд высокочастотных колебаний усилия в цепи на 50 %.

Исследования показывают, что при переходных процессах пуска электромагнитные переходные процессы практически не оказывают влияния на время переходных процессов с затухающим магнитным полем, возникающим при пуске. Резкие изменения электромагнитного момента в начале процесса практически затухают полностью до скорости, соответствующей критическому скольжению. При использовании специальных мер, например осуществление запуска с постепенным ростом напряжения, влияние указанных процессов значительно ослабевает, и резкие изменения момента отсутствуют. Таким образом, для обеспечения

равномерной загрузки приводов необходимо обеспечить автоматический плавный запуск электродвигателей с последующим регулированием скорости в установившемся режиме, а для повышения надежности и долговечности привода и трансмиссии необходимо осуществлять демпфирование колебаний путем использования свойств регулируемого привода, например регулируя скорость концевого привода.

### **3. Математическое моделирование нагруженности механической системы привода исполнительного органа**

Для установления качественных и количественных показателей нагруженности привода было проведено моделирование работы механической системы привода исполнительного органа, на специально разработанной математической модели, для условий: длина лавы 200 м, скорость движения исполнительного органа 1,71 м/с.

Исследованиями установлено, что для лавы длиной 200 м и принятой системы электроснабжения и электрооборудования струговых установок, вследствие различия напряжений на ближайшем и дальнем приводе ( $U_б=0,95U_n$ ,  $U_д=0,85U_n$ ) перегруз ближнего электродвигателя при движении исполнительного органа к дальнему приводу составляет 14 %, а при обратном движении 1,7 %, что составляет за цикл порядка 8%;

Распределение нагрузок между головным и концевым электродвигателями не зависит от местоположения исполнительного органа в забое, изменяется только частота и амплитуда высокочастотной составляющей по мере продвижения исполнительного органа к головному приводу. Низкочастотная составляющая нагрузки реализуется по амплитуде на 70-75 % на головном приводе, высокочастотная составляющая полностью воспринимается головным приводом.

В случае различия номинальных скольжений до +20 % значимого влияния этого фактора на загрузку электродвигателей не установлено. Проведено моделирование влияния таких параметров как неравномерность вытяжки тяговой цепи и износа звезд, различие в шаге звеньев цепи, погрешностей в передаточных числах редукторов. Было установлено, что в случае суммарного 10% различия этих параметров между приводами коэффициент неравномерности загрузки составляет 3,5. Было промоделировано влияние наличия люфта в тяговой цепи на распределение нагрузки между головным и концевым приводами. Полагалось, что люфт в цепи распределялся пропорционально коэффициенту жесткости

соответствующих ветвей тяговой цепи. По результатам моделирования случаев, когда люфт в цепи постоянен, а движение исполнительного органа начиналось с начала, с середины и в конце 200 метровой лавы установлено, что люфт в цепи, в общем случае, оказывает большое влияние на распределение нагрузки. Так при движении исполнительного органа с начала лавы и люфте в цепи, приближенном к фактическому в шахтных условиях ( $\approx 1,5$  м), головной электродвигатель начинал принимать нагрузку через 1,2 с, а концевой через 14,6 с. При проходе исполнительным органом 30 м со скоростью 1,71 м/с, среднее значение мощности, потребляемое головным электродвигателем, составило 195 кВт, а концевым 60 кВт. Коэффициент неравномерности загрузки равнялся 3,25.

В тех же условиях, при начале движения исполнительного органа с середины лавы, головной электродвигатель начал воспринимать нагрузку через 0,8 с, а концевой через 14,9 с. Среднее значение мощности, потребляемое головным приводом при перемещении на 30 м, составило 185 кВт, а концевым 54 кВт. Коэффициент неравномерности загрузки 3,4. В случае перемещения на конечных 30 м лавы средняя мощность, потребляемая головным электродвигателем, составила 175 кВт, а концевым 50 кВт, коэффициент неравномерности загрузки составил 3,5. При этом головной электродвигатель воспринял нагрузку через 0,5 с, а концевой через 14,6 с.

Следовательно, наличие люфта существенно влияет на величину нагрузки привода и требует более подробного исследования. Коэффициент неравномерности загрузки и величина средней нагрузки головного и концевого электродвигателей мало зависят от местоположения исполнительного органа перед началом движения, некоторое их различие объясняется снижением величины потерь в трансмиссии по мере приближения исполнительного органа к головному приводу. При наличии люфта, независимо от местоположения исполнительного органа, переходный процесс не заканчивается выходом электродвигателей на

рабочую часть механической характеристики. Его окончание, выравнивание средних нагрузок электродвигателей, значительно сдвинуто во времени. В течение 20 с после запуска выравнивание мощностей двигателей не происходило. Причем, в это время 78-80 % всей нагрузки приходилось на головной электродвигатель. Таким образом можно считать, что в переходных процессах основную нагрузку воспринимает головной электродвигатель и простое наращивание мощности двигателя не даёт желаемого эффекта, наоборот еще больше возрастают динамические процессы, амплитуды колебаний и уровень нагрузок, что потребует дальнейшего увеличения прочностных характеристик трансмиссии. Кроме того, наличие указанных явлений влечет за собой снижение усталостной долговечности элементов привода, тепловой перегрузки электродвигателей и преждевременному выходу их из строя. Методики расчетов по выбору мощности электродвигателей, прочностных расчетов на усталостную долговечность должны учитывать влияние люфта. Таким образом, в результате моделирования установлено, что наибольшее влияние на неравномерность нагрузки на головной и концевой приводы оказывает превышение на 10 %: различия параметров в шаге цепи, износа звездочек, вытяжки звеньев цепи. При этом перегруз одного из приводов достигает 1,5 кратного значения. Наличие люфта в тяговой цепи играет основную роль в распределении нагрузки. Поскольку наличие люфта оказывало столь существенное влияние на распределение нагрузок между головным и концевым электродвигателями привода исполнительного органа, были проведены специальные шахтные исследования. Результаты шахтных исследований подтвердили данные математического моделирования о существенном влиянии люфта на распределение нагрузок между двигателями. Анализ результатов шахтных исследований показал, что коэффициент неравномерности загрузки электродвигателей находился в пределах от 3,61 до 7,9. Вопрос работоспособности привода, выбора мощности электродвигателей,



надежности установки в целом в принципе не может быть решен без учета всех влияющих факторов.

### **3.1. Математическая модель механической системы привода исполнительного органа**

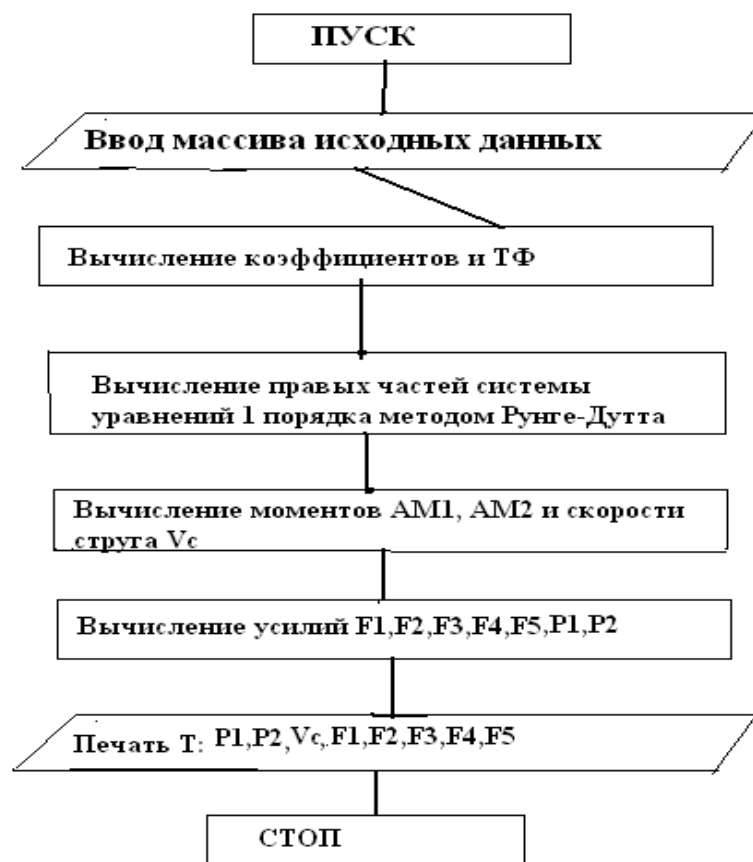
Известно, что на работу струговой установки оказывают влияние: длина установки, жесткость цепи, скорость движения исполнительного органа, его вес, сопротивляемость угля резанию, натяжение цепи, мощность привода, состояние предохранительных устройств и другие.

Оценить влияние этих факторов в период эксплуатации струговых установок не представляется возможным. Поэтому для оценки степени влияния каждого из указанных выше параметров разработана математическая модель и составлена программа её реализации.

Учитывая, что основное отличие работы одноприводной схемы от двухприводной состоит в изменении характера движения исполнительного органа при передаче тягового усилия через обводную звезду, главное внимание при моделировании уделялось оценке процесса изменения скорости движения струга. Эксперименты в шахте показали, что при работе по одноприводной схеме на "длинной цепи" наблюдаются кратковременные остановки исполнительного органа, подобные тем, которые наблюдаются в двухприводных установках при работе их на скорости 0,5 - 0,7 м/с. Поэтому результаты, полученные на модели, оценивались прежде всего по наличию участков, где  $V_c = 0$ . При этом более качественным считается процесс, в котором отсутствует снижение скорости до нуля и где размах колебаний скорости вокруг среднего значения минимальный.

При составлении модели ставилась задача максимального учета характера нагружения привода исполнительного органа в реальных условиях и возможности определения усилий или моментов, действующих на различные конструктивные элементы. Момент сопротивления в модели задается вероятностными показателями случайного процесса - математическим ожиданием и среднеквадратичными отклонениями. В

модели учитываются инерционные массы, жесткость наложенных связей, сопротивление в опорах исполнительного органа, механическая характеристика электродвигателей, конструктивные размеры приводных звезд и предохранительных устройств, порядок работы приводов, скорость исполнительного органа, к.п.д. элементов, качество питающей сети и т.д. На рис.3 показана структурная схема расчета параметров нагружения привода исполнительного органа. Далее представлена математическая модель механической системы привода исполнительного органа.



**Рис.3. Структурная схема расчета параметров нагруженности исполнительного органа**

$$\frac{d\omega_1}{dt} = d_1 M_1 - d_1 M_{01} - d_2 \varphi_1 + d_3 \varphi_2 + d_4 \varphi_3 - d_5;$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \beta_1 M_1 - \beta_1 M_{c1} - \beta_2 \varphi_1 + \beta_3 \varphi_2 + \beta_4 \varphi_3 - \beta_5;$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = -dM_c + d_1 \varphi_1 + d_2 \varphi_2 - d_3 \varphi_3 - d_4 - dM_{c3};$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \omega_1; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \omega_2; \quad \frac{d\omega_3}{dt} = \omega_3;$$

$$M_1 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad \text{при} \quad t \leq t_1 \\ a_0 + a_{01}\omega_1 \quad \text{при} \quad \omega_1 = 0 \\ a_0 + a_1\omega_1 \quad \text{при} \quad 0 < \omega_1 \leq \omega_{кр1} \\ a_2 - a_3\omega_1 \quad \text{при} \quad \omega_{кр} < \omega_1 \leq \omega_{н1} \\ a_4 - a_5\omega_1 \quad \text{при} \quad \omega_{н1} < \omega_1 \leq \omega_0 \\ a_6 - a_7\omega_1 \quad \text{при} \quad \omega_0 < \omega_1 \leq \omega_{кр1} \\ -|a_8 - a_9\omega_1| \quad \text{при} \quad \omega_1 > \omega_{кр1} \end{array} \right\} \text{при} \quad t \leq t_1;$$

$$M_2 = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad \text{при} \quad t \leq t_2 \\ \beta_0 + \beta_{01}\omega_2 \quad \text{при} \quad \omega_2 = 0 \\ \beta_0 + \beta_1\omega_2 \quad \text{при} \quad 0 < \omega_2 \leq \omega_{кр2} \\ \beta_2 - \beta_3\omega_2 \quad \text{при} \quad \omega_{кр2} < \omega_2 \leq \omega_{н2} \\ \beta_4 - \beta_5\omega_2 \quad \text{при} \quad \omega_{н2} < \omega_2 \leq \omega_0 \\ \beta_6 - \beta_7\omega_2 \quad \text{при} \quad \omega_0 < \omega_2 \leq \omega_{кр2} \\ -|\beta_8 - \beta_9\omega_2| \quad \text{при} \quad \omega_2 > \omega_{кр2} \end{array} \right\} \text{при} \quad t \leq t_2;$$

$$a_1 = \frac{1}{\gamma_1}; \quad a_2 = \frac{C_{12} + C_{31}}{\gamma_1}; \quad a_3 = \frac{C_{12}}{\gamma_1}; \quad a_4 = \frac{C_{31}}{\gamma_1} \left(1 + \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0}\right); \quad a_5 = \frac{\Delta\varphi}{\gamma_1} \left(C_{12} - C_{31} \frac{\varphi_3}{\varphi_0}\right);$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\gamma_2}; \quad \beta_2 = \frac{C_{12}}{\gamma_2}; \quad \beta_3 = \frac{C_{12} + C_{31}}{\gamma_2}; \quad \beta_4 = \frac{C_{23}}{\gamma_2} \left(1 + \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0}\right); \quad \beta_5 = \frac{\Delta\varphi}{\gamma_2} \left(C_{23} - C_{12} \frac{\varphi_3}{\varphi_0} C_{23}\right);$$

$$C_{12} = \begin{cases} \frac{C_{н1}}{\ell_{12}} & \text{при} \quad \varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\varphi > 0 \\ 0 & \text{при} \quad \varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\varphi \leq 0 \end{cases} \quad C_{23} = \begin{cases} \frac{C_{н12}}{\ell_{23}} & \text{при} \quad \varphi_2 - \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi\ell_{23}}{\ell_{12}} > 0 \\ 0 & \text{при} \quad \varphi_2 - \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi\ell_{23}}{\ell_{12}} \leq 0 \end{cases}$$

$$C_{23} = \begin{cases} \frac{C_{н12}}{\ell_{23}} & \text{при} \quad \varphi_2 - \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi\ell_{23}}{\ell_{12}} > 0 \\ 0 & \text{при} \quad \varphi_2 - \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi\ell_{23}}{\ell_{12}} \leq 0 \end{cases}$$

$$M_c = \begin{cases} C_{23}\varphi_3 & \text{при } t \leq t_0 \\ -M_0 & \text{при } V_c \leq 0 \\ M - \frac{n_0 V_c R_c}{i} & \text{при } 0 < V_c \leq V_k \end{cases}$$

$$h = \gamma \sqrt{\frac{c_0 \cdot J_c \cdot i^2}{I_{23} \cdot R_2}}; \beta_2 = \frac{h R_2^2}{i}; \varphi_{03} = \frac{\ell_{31} \cdot l}{R_1}$$

$$t_0 = \frac{M_0 R_2 \ell_{23}}{\ell_0 R_2^2} \quad M_v = \beta_c (\omega_2 - \omega_3)$$

$$M = \text{случ}(m_1 \delta); \quad M_z = M_0 + m \Delta \sin(V_z t)$$

$$M = M_x + M_z - M_v;$$

$$M_{cr} = \begin{cases} k_1 M_{y1} \text{sign } \omega_1 & \text{при } \omega_1 \neq 0 \\ 0 & \text{при } \omega_1 = 0 \end{cases} \quad M_{c2} = \begin{cases} k_2 M_{y2} \text{sign } \omega_2 & \text{при } \omega_2 \neq 0 \\ 0 & \text{при } \omega_2 = 0 \end{cases}$$

$$M_{c3} = \begin{cases} k_3 M_{y3} \text{sign } \omega_3 & \text{при } \omega_3 \neq 0 \\ 0 & \text{при } \omega_3 = 0 \end{cases}$$

$$\ell_3 = \ell_{31} + \frac{\varphi_3 R_2}{i}; \quad \ell_{23} = \ell_{12} - \ell_3;$$

$$M_{y1} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\varphi); \quad M_{y2} = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3 + \frac{\Delta\varphi \ell_{23}}{\ell_{12}}); \quad M_{y3} = C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1 + \frac{\Delta\varphi \ell_3}{\ell_{12}});$$

$$M_{y4} = M_{y2} - M_{y1} + M_{c2};$$

$$M_{y5} = M_{y1} + M_{c1} - M_{y3}; \quad M_{y6} = M_{y4} + M_{y1};$$

На печать выводятся следующие параметры:

$$F_1 = \beta_6 M_{y1}; \quad F_2 = \beta_7 M_{y2}; \quad F_3 = \beta_6 M_{y3}; \quad F_4 = \beta_8 M_{y4}; \quad F_5 = \beta_8 M_{y5};$$

$$F_6 = \beta_6 M_{y1} + \beta_7 (M_{y2} + M_{c8})$$

$$V_0 = \begin{cases} \frac{\omega_3 R_2}{i} & \text{при } \omega_3 > 0 \\ 0 & \text{при } \omega_3 \leq 0 \end{cases} \quad P_1 = \frac{M_1 \omega_1}{1000} \quad P_2 = \frac{M_2 \omega_2}{1000}$$

Предварительная программа

$$C_{п1} = \frac{C_0 R_1^2}{i^2}; \quad C_{п2} = \frac{C_0 R_2^2}{i^2}; \quad \varphi_0 = \frac{\ell_{12} i}{R_1} \quad \beta_6 = \frac{\text{in}}{1000 R_1}; \quad \beta_7 = \frac{\text{in}}{1000 R_2};$$

$$\beta_8 = \frac{in_1}{1000R_3}; \beta_9 = \frac{in_1}{1000R_4}; \Delta\varphi = \frac{F_{\Pi} \ell_{12} i}{C_0 R_1};$$

$$a_0 = M_{\Pi 1}; a_{01} = M_{\Pi 1}; a_1 = \frac{M_{\text{кр}1} \cdot M_{\Pi 1}}{\omega_{\text{кр}1}}; a_2 = \frac{\omega_{\text{н}1} (M_{\text{кр}1} \cdot M_{\text{н}1})}{\omega_{\text{н}1} - \omega_{\text{кр}1}};$$

$$a_3 = \frac{M_{\text{кр}1} \cdot M_{\text{н}1}}{\omega_{\text{н}1} \cdot \omega_{\text{кр}1}}; a_4 = \frac{\omega_0 \cdot M_{\text{н}1}}{\omega_0 \cdot \omega_{\text{н}1}}; a_5 = \frac{M_{\text{н}1}}{\omega_0 \cdot \omega_{\text{н}1}}; a_6 = \frac{\omega_0 \cdot M_{\text{кр}1}}{\omega_{\text{кр}1} \cdot \omega_0};$$

$$a_7 = \frac{M_{\text{кр}1}}{\omega_{\text{кр}1} \cdot \omega_0}; a_8 = \frac{2\omega_0 M_{\text{кр}1} - M_{\Pi 1} \omega_{\text{кр}1}}{2\omega_0 \cdot \omega_{\text{кр}1}}; a_9 = \frac{M_{\text{кр}1} - M_{\Pi 2}}{2\omega_0 \cdot \omega_{\text{кр}1}}$$

$$B_0 = M_{\Pi 2}; B_{01} = M_{\Pi 2}; B_1 = \frac{M_{\text{кр}1} - M_{\Pi 2}}{\omega_{\text{кр}2}}; B_2 = M_{\text{н}2} + \frac{\omega_{\text{н}2} (M_{\text{кр}1} - M_{\text{н}2})}{\omega_{\text{н}1} - \omega_{\text{кр}2}};$$

$$B_3 = \frac{M_{\text{кр}1} - M_{\text{н}2}}{\omega_{\text{н}2} - \omega_{\text{кр}2}}; B_4 = \frac{\omega_0 \cdot M_{\text{н}2}}{\omega_0 - \omega_{\text{н}2}}; B_5 = \frac{M_{\text{н}2}}{\omega_0 - M_{\text{н}2}}; B_6 = \frac{M_{\text{кр}2} \cdot \omega_0}{\omega_{\text{кр}2} - \omega_0};$$

$$B_7 = \frac{M_{\text{кр}2}}{\omega_{\text{кр}2} - \omega_0}; B_8 = \frac{2\omega_0 M_{\text{кр}1} - M_{\Pi 2} \omega_{\text{кр}2}}{2\omega_0 - \omega_{\text{кр}2}}; B_9 = \frac{M_{\text{кр}2} - M_{\Pi 2}}{2\omega_0 - \omega_{\text{кр}2}};$$

Таблица 3.1.

### Параметры, задаваемые для расчета на ЭВМ

$J_1$	$\ell_{12}$	$t_2$	$\omega_{\text{н}1}$	$M_{\text{кр}1}$	$\varphi_1(0)$	$V_z$
$J_2$	$\ell_{31}$	$i$	$\omega_0$	$M_{\text{кр}2}$	$\varphi_2(0)$	
$J_c$	$R_1$	$\eta$	$M_{\Pi 2}$	$\omega_{\text{кр}2}$	$\varphi_3(0)$	
$M_0$	$R_2$	$\eta_1$	$M_{\text{кр}2}$	$V_{\text{н}}$	$\gamma$	
$n_0$	$R_3$	$M_{\Pi 1}$	$\omega_{\text{кр}2}$	$T_{\text{в}}$	$\Delta$	
$F_{\Pi}$	$R_4$	$M_{\text{кр}1}$	$M_{\text{н}2}$	$H_p$	$m$	
$K_1$	$\frac{C_0}{1000}$	$\omega_{\text{кр}1}$	$\omega_{\text{н}2}$	$T_{\text{н}}$	$\delta$	
$K_2$	$t_1$	$M_{\text{н}1}$	$\omega_{\text{кр}1}$	$\varepsilon$	$V_{\text{к}}$	

Значение некоторых задаваемых параметров, приведенных в табл.3.1, целесообразно принимать в следующих пределах:

$$\gamma = 0,15 \div 0,3; \quad \Delta = 0,2 \div 0,3; \quad V_{\text{к}} = 1,2 \div 1,7; \quad V_z = 0,3 \div 1; \quad T_{\text{в}} = 2800 \div N;$$

$$n_0 = 4000 \div 0,24N.$$

где  $\gamma$  - коэффициент трения,

$\Delta$  - коэффициент изменения крепости угля вдоль забоя,  
 $V_k$  - критическая скорость исполнительного органа,  $V_z$  - скорость исполнительного органа на пути корреляции,  
 $M_0$  - среднее значение момента сопротивления на исполнительном органе,  
 $F_{cp}$  - среднее значение усилия в цепи от сил резания, погрузки, трения в трансмиссии,  
 $T_0$  - сила трения в опорах исполнительного органа.

В табл.3.1. занесены следующие параметры:

$J_1$  - момент инерции вращающихся элементов концевого приводного блока,  $\text{кгм}^2$ ;  
 $J_2$  - момент инерции вращающихся элементов головного приводного блока,  $\text{кгм}^2$ ;  
 $J_c$  - момент инерции исполнительного органа,  $\text{кгм}^2$ ;  
 $n_0$  - показатель, характеризующий сопротивление в опорах исполнительного органа;  
 $N$  - сила прижатия рештачного става к забою;  
 $F_n$  - сила предварительного натяжения, Н;  
 $K_1, K_2$  - коэффициенты потерь;  
 $l_{12}$  - длина струговой установки, М;  
 $l_{31}$  - длина холостой ветви цепи, М;  
 $R_1$  - радиус звезды концевого приводного блока, М;  
 $R_2$  - то же головного приводного блока, М;  
 $R_3$  - радиус, на котором установлен срезной элемент на концевом блоке, М;  
 $R_4$  - то же на головном блоке, М;  
 $C_0$  - жесткость цепи, Н;  
 $t_1$  - время включения концевого привода блока, с;  
 $t_2$  - время включения головного приводного блока, с;  
 $i$  - передаточное число редуктора;  
 $\eta$  - к.п.д приводного блока;

$\eta_1$  - к.п.д приводного блока до срезного элемента;

$M_{н1}$  - пусковой момент концевого электродвигателя с учётом падения напряжения, Нм;

$M_{кр1}$  - критический момент концевого электродвигателя, Нм;

$\omega_{кр1}$  - критическая угловая скорость концевого электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$M_{н1}$  - номинальный момент концевого электродвигателя, Нм;

$\omega_{н1}$  - номинальная скорость концевого электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$\omega_0$  - синхронная скорость электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$M_{н2}$  - пусковой момент головного электродвигателя, Нм;

$M_{кр2}$  - критический момент головного электродвигателя, Нм;

$\omega_{кр2}$  - критическая угловая скорость головного электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$M_{н2}$  - номинальный момент головного электродвигателя, Нм;

$\omega_{н2}$  - номинальная скорость головного электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$\omega_{кр1}$  - критическая генераторная скорость концевого электродвигателя,  $\frac{1}{с}$ ;

$M_{кр1}$  - критический момент концевого электродвигателя в генераторном режиме, Нм;

$M_{кр2}$  - то же для головного электродвигателя, Нм;

$\omega_{кр2}$  - критическая скорость головного электродвигателя в генераторном режиме,  $\frac{1}{с}$ ;

$V_H$  - номинальная скорость струга,  $\frac{M}{с}$ ;

$T_B$  - длительность расчёта, с;

$H_p$  - шаг печати, с;

$T_H$  - начало отсчёта-0;

$\varepsilon$  - первоначальный шаг интегрирования,  $\varepsilon = 0,01$ ;

$\varphi_1(0), \varphi_2(0), \varphi(0)$  - начальное значение обобщённых координат, рад

$\gamma$  - коэффициент трения;

$\Delta$  - коэффициент изменения крепости угла вдоль забоя;

$m$  - математическое ожидание усилия резания, Н;

$\delta$  - среднеквадратичное отклонение усилия резания, Н.

### **3.2. Оценка достоверности математической модели**

Проверка достоверности модели произведена сопоставлением полученных с её помощью результатов с результатами, полученными на стенде строганием углицементного блока реальной струговой установкой.

В модели были заданы длина установки, соответствующая длине стенда, скорость исполнительного органа 1,5 м/с и момент сопротивления, аналогичный условиям резания углицементного блока.

По результатам моделирования анализировались изменения исследуемых основных параметров работы струговой установки:

$V_c$  - скорость исполнительного органа;

$P_1, P_2$  - мощность на валах концевой и головного электродвигателей;

$F_1, F_2$  - усилия во вспомогательной и основной ветвях цепи;

$F_3$  - усилия в холостой ветви цепи;

$F_4, F_5$  - усилия на срезных элементах головного и концевой приводных блоков;

$F_6$  - усилие стягивания головного приводного блока.

Сопоставление количественных показателей, характеризующих работу струговой установки, замеренных на стенде и рассчитанных с помощью модели при условии, когда цепь не натянута, показывает, что физическая сущность процесса на стенде и в модели адекватна. Особенно показательны в этом плане переходные процессы при пуске. Так же, как и на стенде, в модели запуск приводов с выдержкой времени сопровождается тормозным режимом одного из двигателей, который включается позже, изменением знака момента второго привода. Хорошую сходимость имеют и количественные показатели динамики процессов в модели и в натуральных условиях. Отличие в характере изменения моментов в модели от замеренных



на стенде состоит в том, что в модели влияние зацепления тяговой цепи со звездой привода не учитывается, чтобы не усложнять алгоритм. Это влияние в реальных условиях проявляется только при небольшой длине струговой установки, а с увеличением длины гасится влиянием тяговой цепи.

Аналогично проведено сравнение процессов при работе установки с натянутой цепью, когда она была предварительно натянута с усилием 67 кН.

Сопоставление потребляемой мощности на стенде и на модели показывает, что эти показатели близки. Среднее значение потребляемой мощности головного электродвигателя на стенде составляет 77 кВт, концевое 92 кВт. На модели соответственно 84 кВт и 86 кВт.

Отличие средней суммарной потребляемой мощности на стенде и на модели не превышает 1%. Отличие моментов  $M_1$  составляет 22%, а  $M_2$  - менее 1%. Разница в величинах усилия в рабочей ветви цепи составляет 30%. Полученная разница объясняется отсутствием достоверных сведений о потерях в трансмиссии струговой установки. Судя по величинам значений усилий в основной ветви цепи, величина потерь в модели завышена на 30%. Сходимость по потребляемой мощности объясняется одинаковой нагрузкой на стенде и в модели, но взятой в разном соотношении: заданный момент сопротивления в модели должен быть увеличен, а величина потерь уменьшена.

Анализ коэффициентов динамичности показывает, что качественно процессы изменения моментов, мощности и усилия происходят идентично. Так, коэффициент динамичности мощности  $P_2$  на стенде 1,68, а на модели 1,48, ошибка - 13%: для момента  $M_2$   $K_d = 1,62$  - на стенде, на модели 1,5; ошибка составляет 8%.

При работе струговой установки с предварительным натяжением ( $F_{\Pi}$ ) цепи изменяется усилие в цепи за исполнительным органом. И на стенде и на модели усилие в цепи изменяется от нуля до максимального значения, что обусловлено периодическими стопорения исполнительного органа в забое и образованием слабины цепи.

В обоих вариантах четко отражается увеличение частоты колебаний усилий из-за создания предварительного натяжения цепи.

Результаты сравнения результатов моделирования и стендовых исследований позволяет с достаточной достоверностью моделировать работу струговой установки в реальных условиях с учетом фактических параметров.

Были проведены исследования работы двух- и одноприводной струговых установок применительно к шахтным условиям.

В модели были заданы: длина установки 200 м, среднее значение момента сопротивления 1000 Нм; математическое ожидание сил резания 30 кН, среднеквадратичное отклонение 10 кН; без предварительного натяжения цепи. При двухприводной схеме использовались два положения исполнительного органа: в начале движения в 5 м от концевого привода и после прохода 150 м от концевого привода.

Анализ результатов этих исследований показывает, что с приближением исполнительного органа к головному приводу возрастает частота колебаний основных параметров. Если в начале движения частота колебаний 2,1 Гц, то с приближением к головному приводу частота возросла до 4,5-4,8 Гц.

В начале движения исполнительного органа наблюдались значительные колебания мгновенной скорости: от 0,2 до 3,6 м/с. Это объясняется большой длиной рабочего участка цепи (195м), влиянием момента сопротивления и веса исполнительного органа.

По мере приближения к головному приводу размахи колебаний скорости существенно сокращаются. В начале движения  $K_d=2$ , в 150 м от вспомогательного привода  $K_d=1,39$ .

При одноприводной схеме моделировались два положения исполнительного органа. В начале движения в 5 м от привода и после прохода 150 м от привода. В обоих случаях наблюдались значительные колебания скорости. В начале движения, при большой длине цепи, наблюдается падение мгновенной скорости до нуля. По мере приближения к

обводной звезде частота колебаний скорости исполнительного органа увеличивается с 1,3 Гц до 1,5 Гц. Коэффициент динамичности в этих случаях практически не меняется: в начале движения  $K_d=2,09$  в 150 м от привода  $K_d=2,1$ . Сравнение влияния перемещения исполнительного органа в одноприводной схеме (от привода) с перемещением исполнительного органа в двухприводной схеме от концевго привода к головному показало: в двухприводной схеме колебания скорости исполнительного органа по мере приближения к головному приводу существенно снижаются, тогда как при одноприводной схеме, при движении исполнительного органа от привода колебания изменяются незначительно. При движении исполнительного органа к приводу в одноприводной схеме наблюдается, как и в двухприводной схеме, существенное уменьшение колебаний скорости.

На модели было исследовано влияние длины струговой установки, предварительного натяжения цепи, веса исполнительного органа, скорости движения исполнительного органа на показатели работы при одноприводной схеме.

Влияние изучалось при сохранении неизменными показателей нагруженности и параметров привода.

При моделировании варианта без предварительного натяжения тяговой цепи влияния длины струговой установки, исследовались при движении исполнительного органа от привода. При этом начало движения принималось в 5 м от привода. Длина установки принималась равной 150 м и 100 м. В анализе учитывались результаты моделирования работы установки длиной 200 м.

Сопоставление результатов моделирования при одноприводной схеме с длиной установки 100 м и при двухприводной схеме с длиной установки 200 м показал, практически одинаковое изменение параметров.

В начале движение от привода при длине установки 150 м колебания параметров почти не отличаются от колебаний параметров при длине 100 м.

Рассмотрим работу струговой установки с предварительным натяжением цепи. Вначале проанализируем опыт, когда длина установки 200 м, исполнительный орган движется на обводную звезду и находится в 5 м от привода, сила сопротивления 29 кН и величина предварительного натяжения цепи 29 кН. Этот опыт проведен для определения влияния предварительного натяжения при небольшом значении момента сопротивления.

Для работы струговой установки в указанных условиях, характерным является отсутствие спадов мгновенной скорости до нуля и повышение частоты колебаний скорости с 1,31 Гц и до 2,2 Гц. Резкие изменения мощности привода с выходом в зону генераторного торможения объясняются тем, что усилия в тяговой цепи кратковременно увеличиваются от нуля до 127,5 кН.

В следующем опыте были увеличены сила сопротивления до 49 кН и величина предварительного натяжения цепи до 68,6 кН. Длина установки и движение исполнительного органа, не изменились.

Потребляемая приводом средняя мощность возросла до 153 кВт, но также наблюдались резкие изменения мгновенных значений мощности. Усилия в тяговой цепи также кратковременно увеличивались, но уже до 147 кН. При этом возросла частота кратковременных увеличений усилий.

Когда исполнительный орган находится в 50 м от обводной звезды при движении к ней и тех же параметрах сил резания и предварительного натяжения, наблюдалось уменьшение частоты колебаний скорости с 3,6 Гц до 2,9 Гц. Снижение частоты колебаний скорости по мере продвижения исполнительного органа характерно для струговых установок с предварительным натяжением тяговой цепи. Это объясняется влиянием на колебания скорости участка цепи с большим коэффициентом жесткости. При двухприводной струговой установке с теми же параметрами резания и натяжения, когда исполнительный орган находится в 195 м от привода в сторону которого направлено движение, частота колебаний скорости исполнительного органа составляла 7 Гц.

В следующем эксперименте при длине струговой установки 150 м, собранной по одноприводной схеме, при одинаковых силах резания менялось усилие предварительного натяжения тяговой цепи. Исполнительный орган начинает движение от привода к обводной звезде. Частота колебаний скорости с увеличением усилия предварительного натяжения с 49 кН до 68,6 кН возросла с 1,70 Гц до 2,1 Гц.

С увеличением усилия натяжения на 19,6 кН потребляемая мощность возросла. Дальнейшее увеличение усилия предварительного натяжения до 78,6 кН привело к невозможности осуществить запуск привода.

Далее было проведено исследование влияния массы исполнительного органа (1т, 3т, 5т, 7т, 10т) на формирование нагрузок в элементах струговой установки.

Анализ результатов исследования показывает, что с увеличением массы исполнительного органа частота колебаний всех параметров снижается.

Существенно снижается коэффициент динамичности с 2,3 при массе 1т до 1,1 при массе 10т. Таким образом, увеличение массы исполнительного органа в 10 раз приводит к снижению коэффициента динамичности на 86 %.

Во всех опытах среднее значение суммарных сил сопротивления на исполнительном органе принималось равным 98 кН. Характерным в данной серии опытов является практическая независимость коэффициентов динамичности усилия и мощности электродвигателя от массы исполнительного органа (в этих опытах не учитывалось влияние сил сопротивления на перемещение массы исполнительного органа). Объясняется это тем, что с увеличением массы снижается амплитуда и частота его колебаний, а следовательно, уменьшается и ускорение его движения, что в конечном счете приводит к практически неизменной величине динамической составляющей со стороны исполнительного органа и поэтому нет четкого проявления изменения коэффициента динамичности, как это видно при изменениях скорости.

Физически тенденция к стабилизации скорости исполнительного органа с увеличением его массы объясняется увеличением запаса кинетической энергии и ее реализацией при работе. Такая же тенденция к уменьшению колебаний скорости наблюдается и в опытах с увеличением скорости исполнительного органа до 2 м/с. Сразу после пуска колебания скорости изменяются вокруг среднего значения без снижения до нуля, как это наблюдалось при скорости 1,5 м/с. Даже при уменьшении длины струговой установки до 150м начало движения сопровождается снижением скорости исполнительного органа до нуля, когда скорость была равна 1,5 м/с.

В опытах с увеличением массы и скорости исполнительного органа происходит увеличение кинетической энергии, образующейся при его движении. Так как запас энергии пропорционален квадрату скорости исполнительного органа, ее увеличение и приводит к существенному снижению динамики изменения скорости исполнительного органа даже при работе в одноприводной схеме.

Дальнейшее повышение скорости (до 3 м/с) приводит к еще более значительному снижению размаха колебаний и стабилизации остальных параметров.

#### **4. Исследование нагрузок при стопорении исполнительного органа**

Современные струговые установки представляют собой сложные электромеханические системы с значительными инерционными массами. Для решения задачи снижения механических нагрузок необходимо исследовать действующие усилия в элементах струговой установки при стопорении исполнительного органа.

##### **4.1. Основные допущения, принимаемые при исследовании нагрузок**

Сложность электромеханических процессов, происходящих в приводе исполнительного органа, вызывает необходимость из всего множества действующих сил, связей и моментов выделить главные, определяющие основные характеристики движения.

Расчетные схемы струговых установок с двумя приводными станциями могут быть представлены в виде трехмассовой системы с наложенными упругими связями. Экстремальные нагрузки в трансмиссии исполнительного органа вызываются его стопорением. Для этого случая расчетную схему можно представить двухмассовой системой. При исследовании принимаются следующие допущения:

- силы и моменты, действующие в расчетной схеме, приложены в месте сосредоточения масс;
- инерционные звенья считаются абсолютно жесткими;
- тяговая цепь обладает неизменным значением коэффициента жесткости, что вполне допустимо при незначительных перемещениях;
- деформация цепи линейная и подчиняется закону Гука;
- волновым движением деформации в тяговой цепи можно пренебречь, так как время переходного процесса значительно больше времени распространения волны упругой деформации;
- силы сопротивления в приводных станциях и силы, возникающие при перемещении тяговой цепи, являются силами, действующим на сосредоточенные массы.

Расчетная схема механической системы исполнительного органа, с учетом принятых допущений, представлена на рис.4.

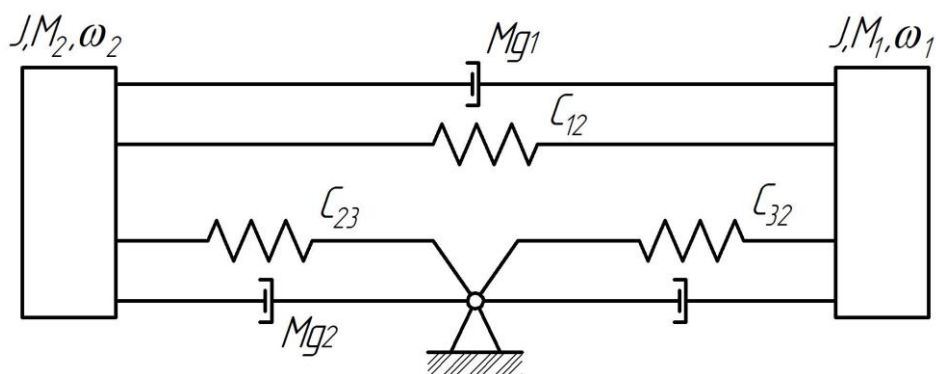


Рис.4. Расчетная схема механической системы исполнительного органа при стопорении

#### 4.2. Уравнения движения механической системы при стопорении исполнительного органа

Для описания движения механической системы исполнительного органа используются обобщенные координаты - угловые для приводных станций и линейные для исполнительного органа.

Согласно принятым допущениям, исследуемую систему можно представить как систему с двумя степенями свободы, с наложенными упругими связями. В режиме стопорения коэффициент жесткости участка цепи между головной приводной станцией и исполнительным органом практически не изменяется. Применительно к рассматриваемому случаю механическая система исполнительного органа представляет собой систему со стационарными голономными связями.

Для исследования динамики системы используются уравнения Лагранжа второго рода. Принимая за обобщенные координаты углы поворота электродвигателей головной и концевой приводных станций, запишем уравнение Лагранжа по каждой из обобщенных координат:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi_1} &= Q + Q_1 - \frac{\delta T}{\delta \varphi_1}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi_2} &= Q + Q_2 - \frac{\delta T}{\delta \varphi_2}, \end{aligned} \quad (4.1)$$



где  $T$  - кинетическая энергия системы

$$T = \frac{J\omega_1^2}{2} + \frac{J\omega_2^2}{2}; \quad (4.2)$$

$J$  - момент инерции приводной станции;

$\omega_1, \omega_2$  - угловые скорости приводных станций;

$Q_1, Q_2$  - обобщенные неконсервативные силы системы;

$$Q_1 = M_1(\omega_1); \quad Q_2 = M_2(\omega_2); \quad (4.3)$$

$M_1, M_2$  - электромагнитные моменты электродвигателей струга;

$Q_1^1, Q_2^1$  - обобщенные моменты сил трения.

Обозначим обобщенные моменты сил трения

$$Q_1^1 = M_{д1}; \quad Q_2^1 = M_{д2}; \quad (4.4)$$

$\Pi$  - потенциальная энергия механической системы струга

$$\Pi = \frac{C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} + \frac{C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1)^2}{2}, \quad (4.5)$$

где  $C_{12}, C_{23}, C_{31}$  - соответственно коэффициенты жесткости

вспомогательной, основной и холостой ветви цепи исполнительного органа;

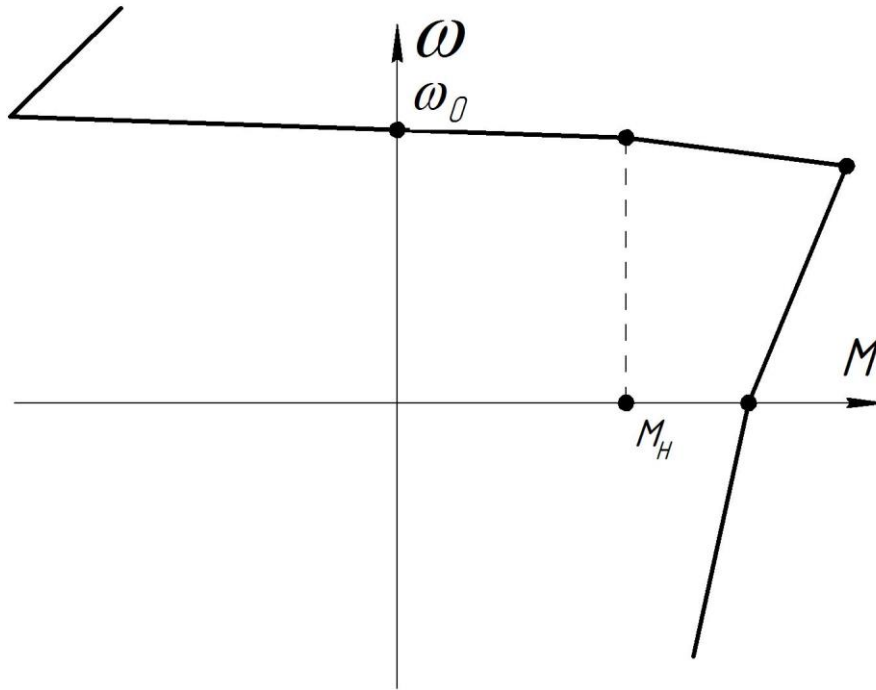
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - обобщенные координаты приводных станций и

исполнительного органа.

Подставляя значение (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) и (4.1) имеем:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_1(\omega_1) - M_{д1} - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1);$$
$$J \frac{d\omega}{dt} = M_2(\omega_2) - M_{д2} - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1). \quad (4.6)$$

Для исследования режима стопорения полученная система (4.6) дополняется уравнениями механических характеристик электродвигателей. Известно, что статическую механическую характеристику без существенной ошибки можно аппроксимировать отрезками прямой. Учитывая наличие гибких связей, а также экстремальные условия, в которых протекает процесс стопорения, можно представить механическую характеристику электродвигателя шестью отрезками (рис.5).



**Рис.5. Линеаризованная механическая характеристика асинхронного электродвигателя**

Такой подход позволяет линеаризовать нелинейное уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя и решать задачу известными методами теории линейных дифференциальных уравнений. Линеаризованное уравнение механической характеристики:

$$M = \begin{cases} a_0 + a_{01}\omega_1 & \text{при } \omega_1 \leq 0; \\ a_0 + a_1\omega_1 & \text{при } 0 < \omega_1 \leq \omega_{кр}; \\ a_2 - a_3\omega_1 & \text{при } \omega_{кр} < \omega_1 \leq \omega_н; \\ a_4 - a_5\omega_1 & \text{при } \omega_н < \omega_1 \leq \omega_с; \\ a_6 - a_7\omega_1 & \text{при } \omega_0 < \omega_1 \leq \omega_{кр}; \\ -|a_8 - a_9\omega_1| & \text{при } \omega_1 > \omega_{кр} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\text{где } a_0 = M_н; \quad a_1 = \frac{M_{кр} - M_н}{\omega_{кр}}; \quad a_{01} = M_н; \quad a_2 = M_н + \frac{\omega_н(M_{кр} - M_н)}{\omega_н - \omega_{кр}};$$

$$a_3 = \frac{M_{кр} - M_н}{\omega_н - \omega_{кр}}; \quad a_4 = \frac{\omega_с M_н}{\omega_0 - \omega_н}; \quad a_5 = \frac{M_н}{\omega_0 - \omega_н}; \quad a_6 = \frac{M_{кр} \omega_с}{\omega_{кр} - \omega_0};$$

$$a_7 = \frac{M_{кр}}{\omega_{кр} - \omega_0}; \quad a_8 = \frac{2\omega_0 M_{кр} - M_н \omega_{кр}}{2\omega_0 - \omega_{кр}}; \quad a_9 = \frac{M_{кр} - M_н}{2\omega_0 - \omega_{кр}};$$

где  $M_н$  - пусковой момент электродвигателя;

$M_{кр}$  - критический момент электродвигателя;

$\omega_{кр}$  - критическая угловая скорость электродвигателя;

$\omega_n$  - номинальная скорость электродвигателя;

$M_n$  - номинальный момент электродвигателя;

$\omega_0$  - скорость идеального холостого хода электродвигателя;

$\omega_{кг}$  - критическая угловая скорость электродвигателя в генераторном режиме;

$M_{кг}$  - критический момент электродвигателя в генераторном режиме.

Тяговая цепь является односторонней упругой связью, т.е. она не может передавать сжимающих усилий, поэтому необходимо ввести ограничения, отражающие физическую сущность процессов.

Из уравнения (4.6) следует, что односторонность упругой связи может быть учтена знаком момента сил упругих деформаций, который определяется значениями обобщенных координат. Это условие выполняется следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{12} & \begin{cases} C_{12} & \text{при } \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0 \\ 0 & \text{при } \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \end{cases} & C_{23} & \begin{cases} C_{23} & \text{при } \varphi_2 \geq 0 \\ 0 & \text{при } \varphi_2 < 0 \end{cases} \\ C_{31} & \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi_1 \geq 0 \\ \Delta & \text{при } \varphi_1 < 0 \end{cases} & & \end{aligned} \quad (4.9)$$

Значение  $\Delta$  зависит от характера стопорения. Если произошло стопорение в забое, то  $\Delta = C_{31}$ . На практике исполнительный орган зачастую, отбрасывается назад в результате реализации энергии упругих сил, накопленной в цепи движущими моментами приводов и инерционными массами. Возникающие при этом усилия в основной ветви цепи превышают те, которые после стопорения создаются приводами. Величина этого превышения зависит от времени торможения инерционных масс и моментов, развиваемых электродвигателями после стопорения. Если имеет место отбрасывание струга назад, то  $\Delta = C_{12}$ .

Совместное решение систем (4.6) и (4.7) дает возможность определить значения обобщенных координат, скоростей, ускорений вращающихся масс приводных станций. При конструировании струговых установок важно знать усилия в элементах трансмиссии исполнительного органа. Для их определения систему (4.6) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} M_1(\omega_1) - M_{д1} - M_{y1} + M_{y4} &= 0; \\ M_2(\omega_2) - M_{д2} - M_{y1} + M_{y2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $M_{y1} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$ ;  $M_{y2} = C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)$ .

Отсюда можно определить моменты сил упругих деформаций в трансмиссии исполнительного органа.

Момент сил упругих деформаций во вспомогательной ветви тяговой цепи, передаваемый на головную приводную станцию:

$$M_{y1} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.11)$$

Учитывая, что при стопорении  $\varphi_3 = \text{const} = 0$ , момент сил упругих деформаций в основной ветви цепи исполнительного органа, который передается на исполнительный орган, равен:

$$M_{y2} = C_{23} \cdot \varphi_2. \quad (4.12)$$

Момент сил упругих деформаций на предохранительном элементе головной приводной станции определяется моментом, передаваемым электродвигателем этой станции (второе уравнение в 4.10).

$$M_{y3} = M_{y2} - M_{y1} + M_{д2}. \quad (4.13)$$

Момент сил упругих деформаций в холостой ветви цепи

$$M_{y4} = \begin{cases} C_{31}|\varphi_1| & \text{при } \varphi_1 < 0 \\ 0 & \text{при } \varphi_1 \geq 0. \end{cases} \quad (4.14)$$

Момент сил упругих деформаций на предохранительном элементе концевой приводной станции определяется моментом электродвигателя этой станции и может быть найден из первого уравнения системы (4.10).

$$M_{y5} = M_{y1} + M_{д1} - M_{y4}. \quad (4.15)$$

Суммарный момент упругих деформаций, передаваемый на вал звезды исполнительного органа, (стягивающий момент) равен:

$$M_{y6} = M_{y2} + M_{y1} + M_{y2}. \quad (4.16)$$

Уравнение (4.16) рассматривает состояние системы, когда струговая установка растянута, т.е. между рештками имеется зазор и равнодействующая всех сил, приложенных к валу приводной звезды, действует на удерживающее устройство. Такое состояние системы возможно, когда в результате взаимодействия сил стопорения и сил упругих деформаций в цепи, рештках и других соединительных элементах произошло раскрытие зазоров. Такое же состояние системы может быть при растягивании установки бермовыми домкратами. Уравнение (4.16) даст максимальное значение равнодействующей сил на приводе при стопорении исполнительного органа, при этом считается, что совпадение во времени стопорения исполнительного органа и цепи конвейера, маловероятно.

Если все зазоры между соединениями выбраны, то равнодействующая сил привода, направлена на стягивание удерживающего устройства:

$$M'_{y6} = M_{y2} + M_{д2}, \quad (4.17)$$

$$\text{т.е. } M'_{y6} < M_{y6}.$$

Момент сил упругих деформаций на выходе звезды концевой приводной станции:

$$M_{y7} = M_{y1} + M_{д1}. \quad (4.18)$$

Момент сил упругих деформаций на выходе звезды головной приводной станции

$$M_{y8} = M_{y2} + M_{д2}. \quad (4.19)$$

Для перевода моментов сил упругих деформаций в усилия в элементах трансмиссии введем коэффициенты.

$$\beta = \frac{i \cdot \eta_1}{1000R} ; \quad \beta_1 = \frac{i \cdot \eta_2}{1000R_1}, \quad (4.20)$$

где  $i$  - передаточное число редуктора;

$\eta_1$  - к.п.д. редуктора с учетом к.п.д. звезды;

$\eta_2$  - к.п.д. редуктора до срезного элемента;

$R$  - радиус звезды исполнительного органа;

$R_1$  - радиус звезды исполнительного органа до срезного элемента.

Усилия в элементах трансмиссии исполнительного органа, соответствующие моментам сил упругих деформаций в трансмиссии, определяется:

$$\begin{aligned} F_1 = \beta \cdot M_{y1}; \quad F_2 = \beta \cdot M_{y2}; \quad F_3 = \beta \cdot M_{y3}; \quad F_4 = \beta \cdot M_{y4}; \quad F_5 = \beta \cdot M_{y5}; \quad F_6 = \beta \cdot M_{y6}; \\ F_7 = \beta \cdot M_{y7}; \quad F_8 = \beta \cdot M_{y8}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Неизвестными в полученных аналитических выражениях (4.1)- (4.21) являются моменты, обусловленные потерями  $M_{д1}$ ,  $M_{д2}$  в уравнении (4.4).

Для определения указанных моментов были проведены экспериментальные исследования на стенде.

Следует заметить, что все экспериментальные исследования, о которых пойдет речь в дальнейшем, и все расчеты производились для условия применения муфта со срезным элементом, как наиболее простых.

Исследования проводились на стенде ШахтНИУИ, оборудованном струговой установкой СН2620. Длина установки на стенде по осям приводных звезд составила 38,5 м. Был установлен жесткий упор с тензодатчиком для фиксации усилий при стопорении.

В рабочей и вспомогательных цепях исполнительного органа были установлены тензодинамометры, свободный ход которых соответствовал полному разгону исполнительного органа до стопорения.

Наряду с усилиями в процессе экспериментов фиксировались мощность, потребляемая приводом и величина тока электродвигателей.

Эксперимент проводился в следующем порядке:

- при стопорении исполнительного органа при работе концевой привода с отключенным головным приводом,
- при стопорении исполнительного органа при работе обоих приводов.

Фиксировались усилия в обеих ветвях цепи и на упоре в момент удара при различной конфигурации конвейерного става и изменении давления в системе подачи.

#### **4.3. Экспериментальные исследования при стопорении одноприводной системы**

Усилие  $F_1$ , зарегистрированное тензодинамометром у концевого привода, имеет максимальную величину 270 кН. В цепи исполнительного органа максимальные усилия  $F_2$  равно 210 кН. Усилие на упоре  $F_y$  равнялось 165 кН. Характерной особенностью формирования усилий  $F_2$  и  $F_y$  является сглаживание максимума. Из графика  $F_y$  можно определить момент столкновения исполнительного органа с упором, когда реализуется кинетическая энергия от его массы. Разность усилий  $F_1$  и  $F_2$  являются весьма существенной – 60 кН. Объяснением такой разницы могут служить потери при движении цепи в направляющих, при этом размеры соединительного звена цепи и проходного отверстия были соизмеримы. Между  $F_2$  и  $F_y$  разность составляет 45 кН. После стопорения значения усилий стабилизируются и "опрокинутый" привод удерживает их на постоянных уровнях. В трансмиссии, теряется примерно 25 кН. Анализируемый опыт производился с прижатием конвейерного става к забою.

В ряде других опытов, с прижатием к забою давлением в системе подачи 75, 40 атм и без прижатия, максимальных значений разность между  $F_1$  и  $F_2$  весьма существенна и колеблется в пределах 60-84 кН. Большее значение соответствует большему прижатию к забою. В зоне активного нагружения разность между  $F_1$  и  $F_2$ , колеблется от 6 кН до 35 кН. Следует отметить, что в проведенных опытах длина цепи, подвергавшейся интенсивному нагружению, составляла 54 м. Если предположить, что разность между  $F_1$  и  $F_2$  зависит от длины цепи, работающей в зоне активного нагружения, по линейному закону, то в реальных условиях эта разность может достигать 200-250 кН, что отрицательно сказывается на

работоспособности исполнительного органа. Необходимо иметь ввиду, что потери усилия будут зависеть как от длины установки и её искривлений в забое, так и от качества изготовления элементов для прохода цепи и соотношения их размеров с размером соединительных звеньев.

Установлено, что потери в трансмиссии зависят от величины передаваемых усилий. Результаты обработки переходного процесса при возрастании нагрузки представлены в таблице 4.1.

Определение величины потерь удобно выражать в виде коэффициента, представляющего собой отношение абсолютной величины потерь  $\Delta F = F_1 - F_2$  к одному из усилий  $F_1$  или  $F_2$ . Обозначая  $\frac{\Delta F}{F_1} = K_1$ ;  $\frac{\Delta F}{F_2} = K$ , строим график зависимости средних значений  $K$  и  $K_1$  от давления в системе подачи (рис.6): и от усилий  $F_1$  и  $F_2$  (рис.7). Построим также графики зависимости от усилий  $F_2$  и  $F_1$  (рис.8 и 9).

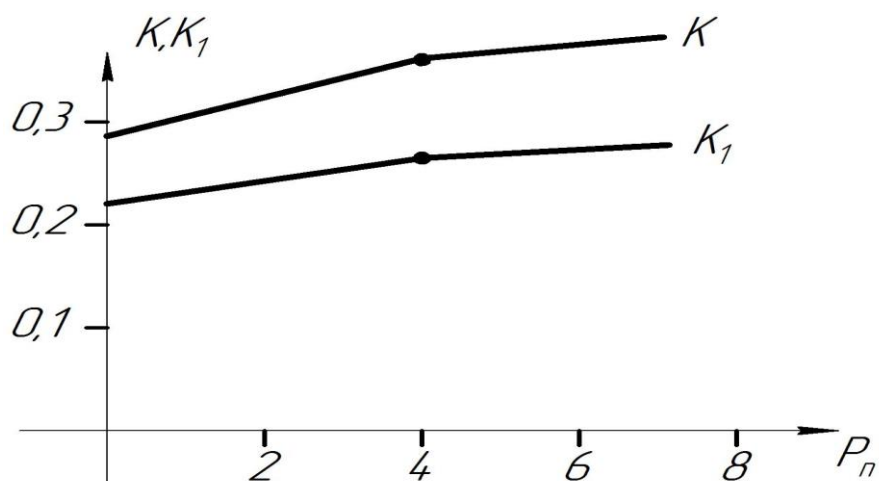
Таблица 4.1

**Результаты обработки параметров переходных процессов в цепи исполнительного органа**

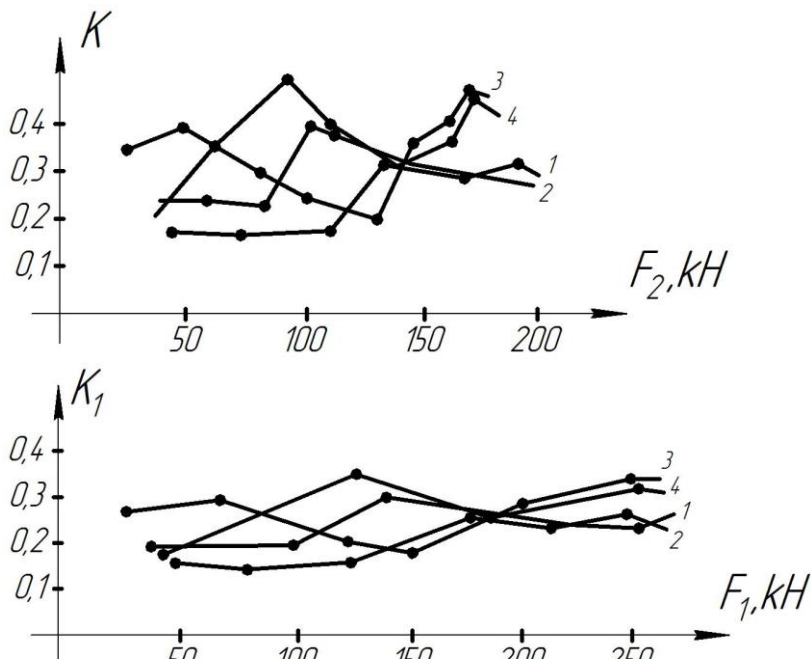
№ опыта	$F_1$ кН	$F_2$ кН	$\Delta F = F_1 - F_2$ кН	$K = \frac{\Delta F}{F_2}$	$K_1 = \frac{\Delta F}{F_1}$	$P_{\text{п}}$ МПа
1	52,6	44,8	7,8	0,174	0,148	0
	84,1	72,5	11,6	0,16	0,138	
	129,6	110,9	18,7	0,169	0,144	
	178,7	136,5	42,2	0,309	0,236	
	215,5	168,5	47	0,279	0,218	
	250,5	191,9	58,6	0,305	0,234	
	257,5	200,5	57	0,284	0,221	
Среднее	166,9		24,7	0,240	0,191	
2	47,3	38,4	8,9	0,232	0,188	0
	73,6	59,7	13,9	0,233	0,189	
	101,6	83,2	18,4	0,221	0,181	
	145,4	104,5	40,9	0,392	0,281	
	189,2	145,0	44,2	0,305	0,234	
	241,7	189,8	51,9	0,273	0,215	
	255,8	200,5	55,3	0,276	0,216	



Продолжение табл.4.1.						
	268,1	202,6	65,5	0,323	0,244	
Среднее	-165,13	-127,96	-37,375	0,282	0,219	
3	31,5	23,5	8	0,34	0,254	4
	68,3	49,1	19,2	0,391	0,281	
	105,1	81,0	24,1	0,298	0,229	
	126,1	102,4	23,7	0,231	0,188	
	157,7	132,2	25,5	0,193	0,162	
	199,7	147,2	52,5	0,357	0,263	
	227,7	162,1	65,6	0,405	0,288	
	250,5	170,6	79,9	0,468	0,319	
	259,3	177,0	82,3	0,465	0,317	
Среднее	158,4	116,12	42,3	0,35	0,256	
4	43,8	36,3	7,5	0,207	0,171	7,5
	84,1	61,8	22,3	0,361	0,265	
	127,9	85,3	42,6	0,499	0,333	
	157,7	113,0	44,7	0,396	0,283	
	183,9	140,8	43,1	0,306	0,234	
	222,5	164,2	58,3	0,355	0,262	
	255,8	177,0	78,8	0,445	0,308	
	264,5	187,7	76,8	0,409	0,290	
Среднее	167,5	120,76	46,76	0,37	0,268	
	$F_1$	$F_2$	$\Delta F$	$\frac{\Delta F}{F_2}$	$\frac{\Delta F}{F_1}$	

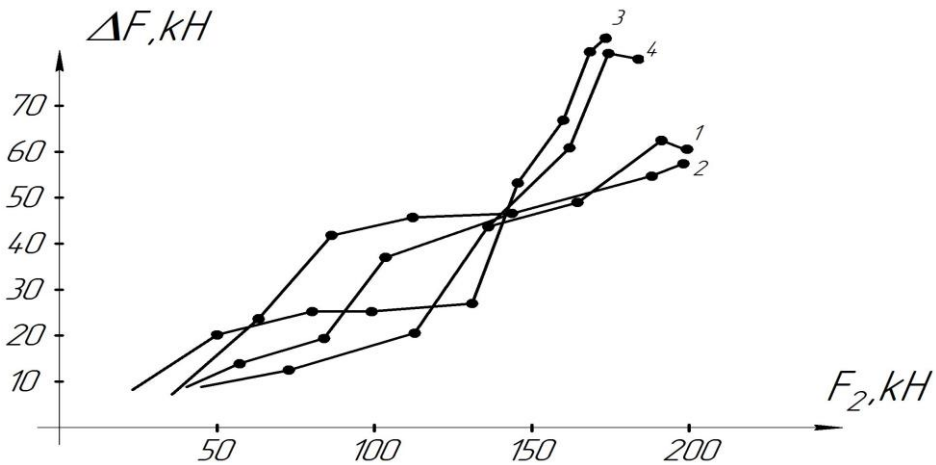


**Рис.6.График зависимости среднего значения коэффициента потерь от давления в системе подачи**



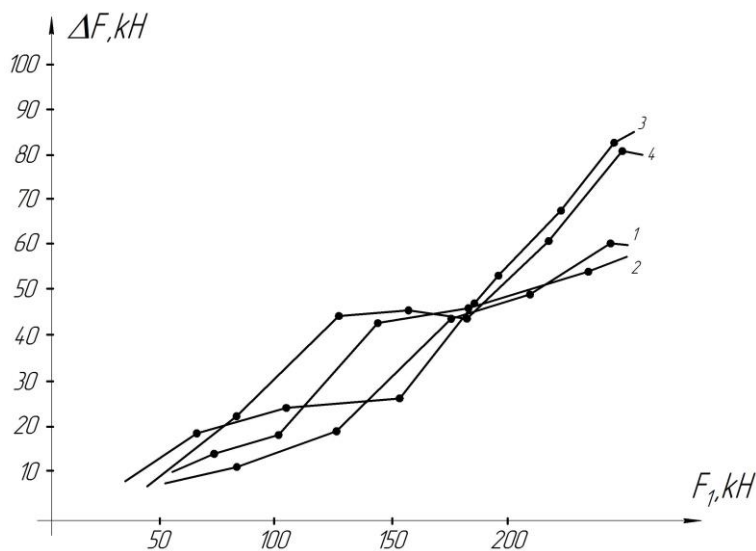
**Рис.7. Графики зависимости  $k=f(F_2)$  и  $k_1=f(F_1)$**

- 1-став прямой  $P_n=0$
- 2-став изогнут  $P_n=0$
- 3- давление в системе подачи  $P_H=4$  МПа
- 4-давление в системе подачи  $P_H=7,5$  МПа



**Рис.8. Графика зависимости  $\Delta F = f(F_2)$**

- 1-став прямой  $P_n=0$
- 2-став изогнут  $P_n=0$
- 3- давление в системе подачи  $P_H=4$  МПа
- 4-давление в системе подачи  $P_H=7,5$  МПа



**Рис.9. Графики зависимости  $\Delta F = f(F_1)$**

1-став прямой  $P_n=0$

2-став изогнут  $P_n=0$

3- давление в системе подачи  $P_n=4$  МПа

4-давление в системе подачи  $P_n=7,5$  МПа

Из графиков на рис. 6,7,8,9 видно, что потери зависят от искривленности установки и давления в системе подачи. Величина потерь пропорциональна усилию в тяговой цепи.

Лучшие статистические показатели у коэффициента  $K_1$ , что позволяет рекомендовать при аналитических исследованиях использовать именно его.

Важно отметить, что при неизменном давлении в системе подачи (табл.4.1) значение коэффициента  $K_1$  в пределах опыта изменяется незначительно. Для определения коэффициента потерь в зоне снижения усилий была проведена обработка данных с шагом квантования процесса  $\Delta t=0,02$ . При этом усилие на исполнительном органе  $F_2$  после достижения максимума стабилизируется, и несмотря на то, что усилие на приводе падает, остается некоторое время постоянным. Это объясняется следующим. При  $\omega=0$  имеем  $F_1=\max$  и уравнение равновесия сил имеет вид

$$F_1 = F_n + F_2, \quad (4.22)$$

где  $F_1$ -усилие у звезды приводной станции;

$F_n$  -силы сопротивления;

$F_2$ - усилие на исполнительном органе.

В следующий момент времени, когда динамическая составляющая момента привода начинает уменьшаться, электродвигатель развивает момент, равный пусковому, усилие в цепи становится большим, чем развиваемое приводом, и начинается движение системы в противоположном направлении. Важным является тот факт, что, как указывалось выше,  $F_2$  при уменьшении  $F_1$  остается неизменным в течении 0,1-0,15 с.

Из уравнения (4.22) следует, что возможен вариант, когда с уменьшением  $F_1$  будет уменьшаться только составляющая  $F_{\pi}$ . Такое перераспределение усилий наблюдается практически до момента, когда  $F_{\pi}$  станет равным нулю. С дальнейшим уменьшением  $F_1$  начинает уменьшаться  $F_2$ , а  $F_{\pi}$  меняет знак на противоположный. Значение  $F_{\pi}=0$  возможно, когда все звенья имеют одинаковую деформацию.

При исследовании формирования нагрузок в трансмиссии исполнительного органа в условиях стенда можно принимать коэффициент потерь при  $P_{\pi}=0$  для прямой установки  $K_1=0,15-0,16$ , изогнутой  $K_1=0,16-0,17$ , при  $P_{\pi}=4\text{МПа}$  -  $K_1=0,2-0,21$ . Для промежуточных значений давлений в системе подачи при  $P_{\pi}=4\text{МПа}$  коэффициент потерь вычисляется методом интерполяции. Для уточнения расчетных значений максимальных значений усилий следует принимать среднее значение коэффициента потерь, вычисленное по переднему фронту усилий, а минимальных – по заднему.

Следует подчеркнуть, что полученные значения коэффициента потерь соответствуют параметрам установки на стенде.

#### **4.4. Экспериментальные исследования при стопорении двухприводной системы**

Приводные станции были собраны с передаточным числом 18,5, что соответствует скорости исполнительного органа 1,5 м/с. Целью этого этапа исследований было определение максимально возможных нагрузок в трансмиссии и установление нагружения каждой из приводных станций. Включение электродвигателей осуществлялось также, как и в шахтных

условиях с минимальной выдержкой между включениями приводов 0,2-0,3 с. Для получения максимальных нагрузок приводные станции оснащались предохранительными элементами повышенной прочности. Перед стопорением исполнительный орган устанавливался на таком расстоянии от упора, чтобы обеспечивался выход всей системы на номинальную скорость движения.

Анализ результатов этого опыта позволил установить, что, в момент нагружения головного привода до максимума нагрузка на концевом приводе была меньше т.е. максимальные значения усилий на приводах достигаются не одновременно, с разницей в 0,04 с. Максимальные значения усилия  $F_y$  равно 32 тс, нарастание максимума произошло за 0,15 с.

#### **4.5. Исследование экстремальных нагрузок на ЭВМ**

Основной целью этого этапа исследования была отработка математической модели работы струговой установки в условиях

экстремальных нагрузок для применения на стадии проектирования с использованием параметров конкретной установки.

В связи с большим количеством исследуемых параметров и многообразием условий приложения экстремальных нагрузок исследование проводилось с помощью ЭВМ. Целью явилось, на основе полученных результатов, создание инженерного метода расчета по обобщенным формулам.

Имеющиеся в модели нелинейности механических характеристик асинхронных двигателей и коэффициента жесткости линеаризуются представлением механической характеристики отдельными участками и постоянством коэффициента жесткости на ограниченном участке перемещения.

Для решения задачи необходимо задать значение постоянных коэффициентов, величину потерь, угловую скорость электродвигателя по его механической характеристике, уравнения моментов, а также задать

начальные условия. Ниже приведены принятые обозначения и значения некоторых исходных данных для расчета:

$M_{п1}, M_{п2}$  - пусковые моменты электродвигателей, Нм;

$M_{кр1}, M_{кр2}$  - критические моменты электродвигателей, Нм;

$\omega_{н1}, \omega_{н2}$  - номинальные угловые скорости электродвигателей, рад/с;

$\omega_{кр1}, \omega_{кр2}$  - критическая скорость электродвигателей, рад/с;

$\omega_c$  - скорость идеального холостого хода электродвигателя, рад/с;

$M_{н1}, M_{н2}$  - номинальные моменты электродвигателей, Нм;

$\omega_{кг1}, \omega_{кг2}$  - критические угловые скорости электродвигателей в генераторном режиме, рад/с;

$M_{кг1}, M_{кг2}$  - критические моменты электродвигателей в генераторном режиме, Нм;

$C_{пр}$  - приведенная жесткость рассматриваемого участка цепи, Нм.

Значения коэффициентов  $K_1, K_2$  определяются экспериментально. Для условий стенда:

$$K_1 = 0,16 - 0,21; K_2 = \frac{K_1 \ell_x}{\ell_{12}},$$

где  $\ell_x$  - расстояние от звезды основной проводной станции до места стопорения исполнительного органа, м;

$\ell_{12}$  - длина вспомогательной ветви тяговой цепи, м;

$\ell_{23}$  - длина основной ветви тяговой цепи, м;

$\ell_{12}$  - длина холостой ветви тяговой цепи, м;

$C_0$  - удельная жесткость тяговой цепи, принята равной  $5,0031 \cdot 10^7$  Н;

$K_3, K_4$  - коэффициенты, учитывающие изменение потерь при скорости равной нулю. Принимаем  $K_3 = K_4 = 1$ ;

$J$  - момент инерции приводной станции, кгм<sup>2</sup>;

$R$  - радиус звезды исполнительного органа, м;

$i$  - передаточное число редуктора.

Для приведения системы дифференциальных уравнений к форме стандартной программы введем обозначение:

а) инерционные коэффициенты:

$$\alpha = \frac{1}{J}; \quad \alpha_2 = \gamma = \frac{C_{12}}{J}; \quad \alpha_3 = \gamma_1 = \frac{C_{31}}{J}; \quad \alpha_4 = \gamma_2 = \frac{C_{23}}{J},$$

$$C_{12} = \frac{C_x}{\ell_{12}}; \quad C_{31} = \frac{C_x}{\ell_{31}}; \quad C_{23} = \frac{C_x}{\ell_{23}}; \quad C_x = \frac{C_x R^2}{\ell^2}; \quad C_x = \frac{C_x}{\ell_x}.$$

Обозначим параметры электродвигателя и участки его механической характеристики в линеаризованном виде:

$$a_0 = M_{н1}; \quad b_0 = M_{н2}; \quad a_{01} = M_{н1}; \quad b_{01} = M_{н2};$$

$$a_1 = \frac{M_{кр1} - M_{н1}}{\omega_{кр1}}; \quad b_1 = \frac{M_{кр2} - M_{н2}}{\omega_{кр2}}; \quad a_2 = M_{н1} + \frac{\omega_{н1} \cdot (M_{кр1} - M_{н1})}{\omega_{н1} - \omega_{кр1}};$$

$$b_2 = M_{н2} + \frac{\omega_{н2} (M_{кр2} - M_{н2})}{\omega_{н2} - \omega_{кр2}}; \quad a_3 = \frac{M_{кр1} - M_{н1}}{\omega_{н1} - \omega_{кр1}}; \quad b_3 = \frac{M_{кр2} - M_{н2}}{\omega_{н2} - \omega_{кр2}};$$

$$a_4 = \frac{\omega_0 M_{н1}}{\omega_0 - \omega_{н1}}; \quad b_4 = \frac{\omega_0 M_{н2}}{\omega_0 - \omega_{н2}}; \quad a_5 = \frac{M_{н1}}{\omega_0 - \omega_{н1}}; \quad b_5 = \frac{M_{н2}}{\omega_0 - \omega_{н2}}; \quad a_6 = \frac{\omega_0 M_{кр1}}{\omega_{кр1} - \omega_c};$$

$$b_6 = \frac{\omega_0 M_{кр2}}{\omega_{кр2} - \omega_c}; \quad a_7 = \frac{M_{кр1}}{\omega_{кр1} - \omega_c}; \quad b_7 = \frac{M_{кр2}}{\omega_{кр2} - \omega_c};$$

$$a_8 = \frac{2\omega_0 M_{кр1} - M_{н1} \omega_{кр1}}{2\omega_0 - \omega_{кр1}}; \quad b_8 = \frac{2\omega_0 M_{кр2} - M_{н2} \omega_{кр2}}{2\omega_0 - \omega_{кр2}}; \quad a_9 = \frac{M_{кр1} - M_{н1}}{2\omega_0 - \omega_{кр1}};$$

$$b_9 = \frac{M_{кр2} - M_{н2}}{2\omega_0 - \omega_{кр2}}$$

Полагая, что в период, предшествующий стопорению, электродвигатели развивали моменты  $M_1$  и  $M_2$  (например,  $M_1 = M_2 = M$ ) и соответствующие угловые скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , запишем исходную систему уравнений:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \alpha M_1 - \alpha M_{д1} - (\alpha_2 + \alpha_3) \varphi_1 + \alpha_2 \varphi_2$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \alpha M_2 - \alpha M_{д2} + \alpha_2 \varphi_1 - (\alpha_2 + \alpha_4) \varphi_2 \quad (4.23)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1; \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2,$$

где с учетом принятых выше обозначений:

$$M_1 = \begin{cases} a_0 + a_{01}\omega_1 & \text{при } \omega_1 \leq 0 \\ a_0 + a_1\omega_1 & \text{при } 0 < \omega_1 \leq \omega_{кр1} \\ a_2 - a_3\omega_1 & \text{при } \omega_{кр1} < \omega_1 \leq \omega_{н1} \\ a_4 - a_5\omega_1 & \text{при } \omega_{н1} < \omega_1 \leq \omega_0 \\ a_6 - a_7\omega_1 & \text{при } \omega_0 < \omega_1 \leq \omega_{кр1} \\ -|a_8 - a_9\omega_1| & \text{при } \omega_1 > \omega_{кр1} \end{cases}$$

$$M_2 = \begin{cases} b_0 + b_{01}\omega_2 & \text{при } \omega_2 \leq 0 \\ b_0 + b_1\omega_2 & \text{при } 0 < \omega_2 \leq \omega_{кр2} \\ b_2 - b_3\omega_2 & \text{при } \omega_{кр} < \omega_2 \leq \omega_{н2} \\ b_4 - b_5\omega_2 & \text{при } \omega_{н2} < \omega_2 \leq \omega_0 \\ b_6 - b_7\omega_2 & \text{при } \omega_0 < \omega_2 \leq \omega_{кр2} \\ -|b_8 - b_9\omega_2| & \text{при } \omega_2 > \omega_{кр2} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} \gamma & \text{при } \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0 \\ 0 & \text{при } \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \end{cases}; \quad \alpha_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi_1 \geq 0 \\ \gamma_1 & \text{при } \varphi_1 < 0 \end{cases};$$

$$\alpha_4 = \begin{cases} \gamma_2 & \text{при } \varphi_2 \geq 0 \\ 0 & \text{при } \varphi_2 < 0 \end{cases}; \quad M_{д1} = \begin{cases} M_{ит1} \text{sign } \omega_1 & \text{при } \omega_1 \neq 0 \\ K_3 M_{ит1} & \text{при } \omega_1 = 0 \end{cases}$$

$$M_{д2} = \begin{cases} M_{ит2} \text{sign } \omega_2 & \text{при } \omega_2 \neq 0 \\ K_4 M_{ит2} & \text{при } \omega_2 = 0 \end{cases}$$

$$M_{ит1} = K_1 M_{y7}; M_{ит2} = K_2 M_{y8}; M_{y1} = J\alpha_2(\varphi_1 - \varphi_2); M_{y2} = J\alpha_4 \cdot \varphi_2;$$

$$M_{y3} = M_{y2} - M_{y1} + K_2 M_{y8}; M_{y4} = J\alpha_3 \cdot \varphi_1; M_{y5} = M_{y1} - M_{y4} + K_1 M_{y7};$$

$$M_{y6} = M_{y2} + K_0 M_{y1} + K_2 M_{y8}; M_{y7} = \frac{M_{y1}}{1 - K_1}; M_{y8} = \frac{M_{y2}}{1 - K_2}; F_1 = \beta M_{y1};$$



$$F_2 = \beta M_{y2}; F_3 = \beta_1 M_{y3}; F_4 = \beta M_{y4}; F_5 = \beta_1 M_{y5}; F_6 = \beta M_{y6};$$

$$F_7 = \beta M_{y7}; F_8 = \beta M_{y8}$$

Находим значения моментов сил упругих деформаций во вспомогательной и основной ветвях цепи исполнительного органа:

$$M_{y1} = M_1 - M_{д1} + M_{y4} = M_1 - K_1 M_{y7}; \quad M_{y4} = 0 \quad (4.25)$$

Из системы (4.24) имеем :

$$M_{д1} = K_1 M_{y7} = \frac{K_1 M_{y1}}{1 - K_1}. \quad (4.26)$$

Подставив (4.26) в (4.25), имеем:

$$M_{y1} = (1 - K_1) M_1. \quad (4.27)$$

Далее

$$M_2 + M_{y1} = M_{д2} + M_{y2}. \quad (4.28)$$

Из системы (4.24) находим

$$M_{д2} = K_2 M_{y8} = \frac{K_2 M_{y8}}{1 - K_2}. \quad (4.29)$$

Решая совместно (4.28) и (4.29), получим:

$$M_{y2} = (1 - K_2)(M_2 + M_{y1}). \quad (4.30)$$

Определяем начальные значения  $M_{y1}$  и  $M_{y2}$  по формулам (4.28) и (4.30)

Находим начальные значения обобщенных координат  $\varphi_2(0)$  и  $\varphi_1(0)$ .

а) для головной приводной станции

$$\varphi_2(0) = \frac{M_1 + M_2 - M_{пр1} - M_{пр2}}{J\alpha_4}; \quad (4.31)$$

$$M_{пр1} = K_1 M_{y7} = \frac{K_1 M_{y1}}{1 - K_1} = \frac{K_1 (1 - K_1) M_1}{1 - K_1} = K_1 M_1; \quad (4.32)$$

$$M_{пр2} = K_2 M_{y8} = \frac{K_2 M_{y2}}{1 - K_2} = \frac{K_2 (1 - K_2)(M_2 + M_{y1})}{1 - K_2} = K_2 (M_2 + M_{y1}). \quad (4.33)$$

Определяем начальные значения:

$$M_{y7} = \frac{M_{y1}}{1-K_1} = \frac{(1-K_1)M_1}{1-K_1} = M_1; \quad (4.34)$$

$$M_{y8} = \frac{M_{y2}}{1-K_2} = \frac{(1-K_2)(M_2 + M_{y1})}{1-K_2} = M_2 + M_{y1} \quad (4.35)$$

б) для вспомогательной приводной станции

$$\varphi_1(0) = \frac{M_1 - M_{пт1} + J\alpha_2\varphi_2(0)}{J\alpha_2}. \quad (4.36)$$

Полученные коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  и начальные значения  $\varphi_1, \varphi_2, M_{д1}, M_{д2}$  подставляем в дифференциальные уравнения для проверки правильности решения. В правых частях уравнений должны быть получены числа, близкие к нулю.

Задание исходных данных для вычисления нагрузок в трансмиссии на ЭВМ производится в следующем порядке

$K_3, K_4, K_1, K_2, a_{01}, b_{01}, \Delta T, M_{д1}, \beta, \beta_1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \omega_{кр1}, \omega_{н1}, \omega_{кр2}, \omega_{н2}, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, \gamma, \gamma_1, J, \gamma_2, \varepsilon_1, T, \Delta T.$

$$\Delta T = 0,001; \varepsilon = 1;$$

$\Delta T$  шаг квантования процесса, как правило  $\Delta T = 0,05$  с;

$T$  длительность процесса, не более 10 с, как правило  $T = 5$  с.

Блок-схема решения задачи определения экстремальных нагрузок представлена на рис.10.

Приведем пример реализации программы расчета, для условий стендовых исследований.

Длина установки по центрам звезд струга - 38,5 м.

Место стопорения исполнительного органа струга - 15 м от головной приводной станции.

Момент инерции приводной станции, приведенный к валу электродвигателя  $J = 2,072$  кгм<sup>2</sup>.

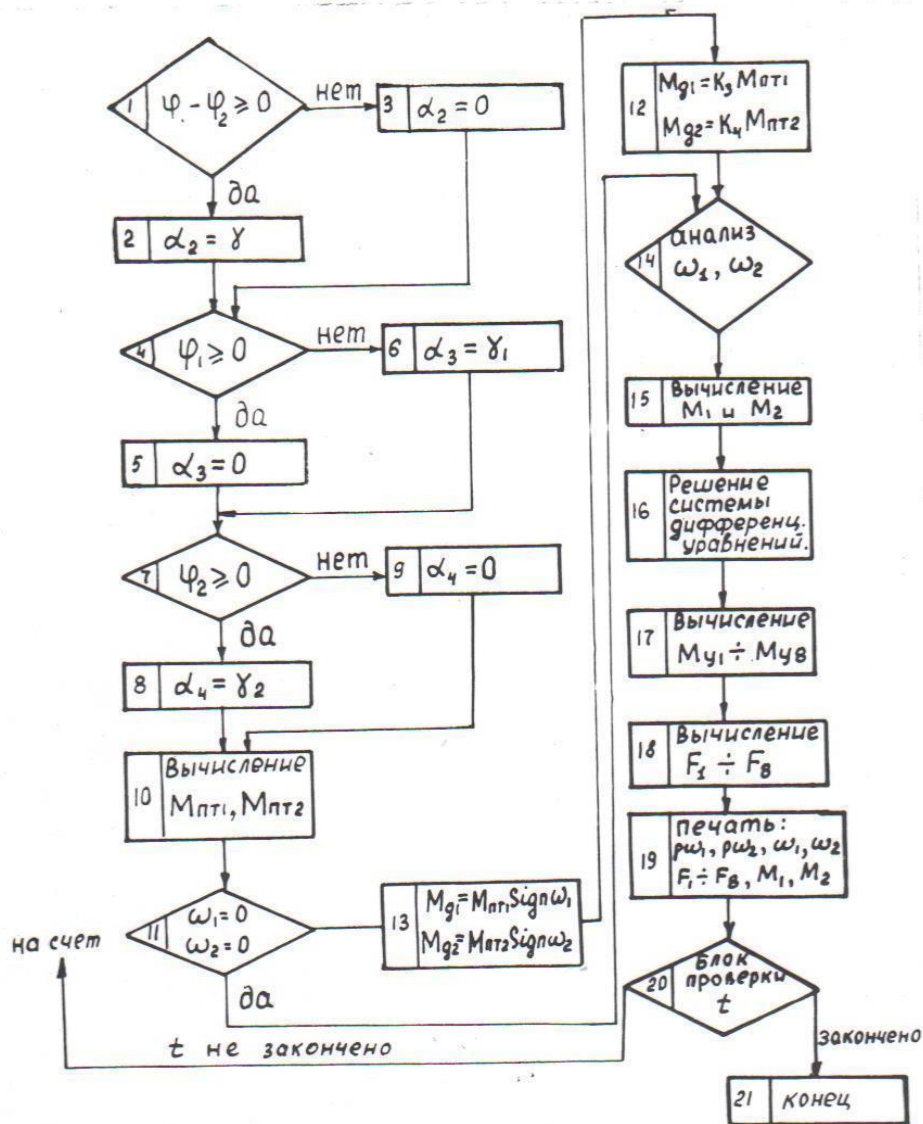


Рис.10. Блок-схема решения задачи.

Жесткость погонного метра цепи  $C_0 = 5,0031 \cdot 10^7 \text{ Н}$ .

Пусковой момент  $M_{\text{п}} = 1471,53 \text{ Нм}$ .

Критический момент  $M_{\text{кр}} = 1912,95 \text{ Нм}$ .

Номинальный момент  $M_{\text{н}} = 518,2 \text{ Нм}$ .

Критический момент генераторного режима электродвигателя

$M_{\text{кр}} = -1912,95 = -1912,95 \text{ Нм}$ .

Скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Угловая скорость номинального режима  $\omega_{\text{н}} = 154,38 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Критическая угловая скорость  $\omega_{кр} = 138,16 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Критическая угловая скорость в генераторном режиме  $\omega_{кр} = 175,84 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Передаточное число редуктора  $i=18,1$ .

Радиус звезды исполнительного органа  $R=0,178$  м.

Радиус звезды до срезного элемента  $R_1=0,15$  м.

к.п.д. электродвигателя  $\eta_2 = 0,918$ .

к.п.д. редуктора  $\eta_1 = 0,95$ .

к.п.д. звезды исполнительного органа  $\eta_1 = 0,95$ .

к.п.д. привода равен 0,83.

Расчет приведен для случая, когда  $M_{пр1}=K_1M_{y1}$ ;  $M_{пр2}=K_2M_{y2}$

Программа предусматривает возможность учета разброса механических характеристик электродвигателей. В данном расчете принято, что механические характеристики идентичны.

Исходные данные для расчета

$$a_0 = v_0 = 1471,53;$$

$$a_1 = v_1 = 3,195;$$

$$a_2 = v_2 = 13793,3;$$

$$a_3 = v_3 = 85,989;$$

$$a_4 = v_4 = 31052,44;$$

$$a_5 = v_5 = 197,79;$$

$$a_6 = v_6 = 15941,25;$$

$$a_7 = v_7 = 101,54;$$

$$a_8 = v_8 = 2474,76;$$

$$a_9 = v_9 = 3,195;$$

$$\alpha = 0,4826;$$

$$\alpha_2 = 60,65;$$

$$\beta = 0,084; \quad \beta_1 = 0,0996;$$

$$\alpha_3 = 60,65 ;$$

$$\alpha_4 = 155,68 ;$$

$$\text{Принимаем } K_1 = 0,375; K_2 = \frac{K_1 \cdot \ell_x}{\ell_{12}} = 0,146.$$

Находим начальные условия для моментов:

$$M_{y1} = \frac{M_{н1}}{1 + K_1} = 376,95 \text{ Нм};$$

$$M_{y2} = \frac{M_{y1} + M_{н2}}{1 + K_2} = 781,2 \text{ Нм};$$

$$\omega_1 = \omega_2 = 154,38 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Потери во вспомогательной и основной ветвях цепи исполнительного органа:

$$M_{пт1} = 141,36 \text{ Нм};$$

$$M_{пт2} = 114,06 \text{ Нм};$$

Начальные значения обобщенных координат

$$\varphi_2^{(0)} = 2,422 \text{ рад};$$

$$\varphi_1^{(0)} = 5,421 \text{ рад}.$$

Проверяем дифференциальные уравнения для момента времени  $t=0$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = 0,4826 \cdot 518,31 - 0,4826 \cdot 141,4 - (60,65 + 0) \cdot 5,421 + 60,65 \cdot 2,422;$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = 0,4826 \cdot 518,31 - 0,4826 \cdot 114,06 + 60,65 \cdot 5,421 - (60,65 + 155,68) \cdot 2,422.$$

В правых частях этих равенств должны получиться числа, близкие к нулю, в данном случае

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -0,0074; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = -0,0766.$$

Для контроля правильности решения на ЭВМ определяем значение усилий при  $t=0$

$$F_1 = \beta M_{y1} = 31,66 \text{ кН}.$$

$$F_2 = \beta M_{y2} = 65,62 \text{ кН}.$$

$$F_3 = \beta_1 M_{y3} = \beta_1 (M_{y2} - M_{y1} + K_2 M_{y2}) = 54,42 \text{ кН} .$$

$$F_4 = 0$$

$$F_5 = \beta_1 (M_{y2} - M_{y4} + K_1 M_{y1}) = 54,42 \text{ кН} .$$

$$F_6 = \beta (M_{y2} + M_{y1} + K_2 M_{y2}) = 106,8 \text{ кН} .$$

$$F_7 = \beta (M_{y1} + K_1 M_{y1}) = 43,53 \text{ кН} .$$

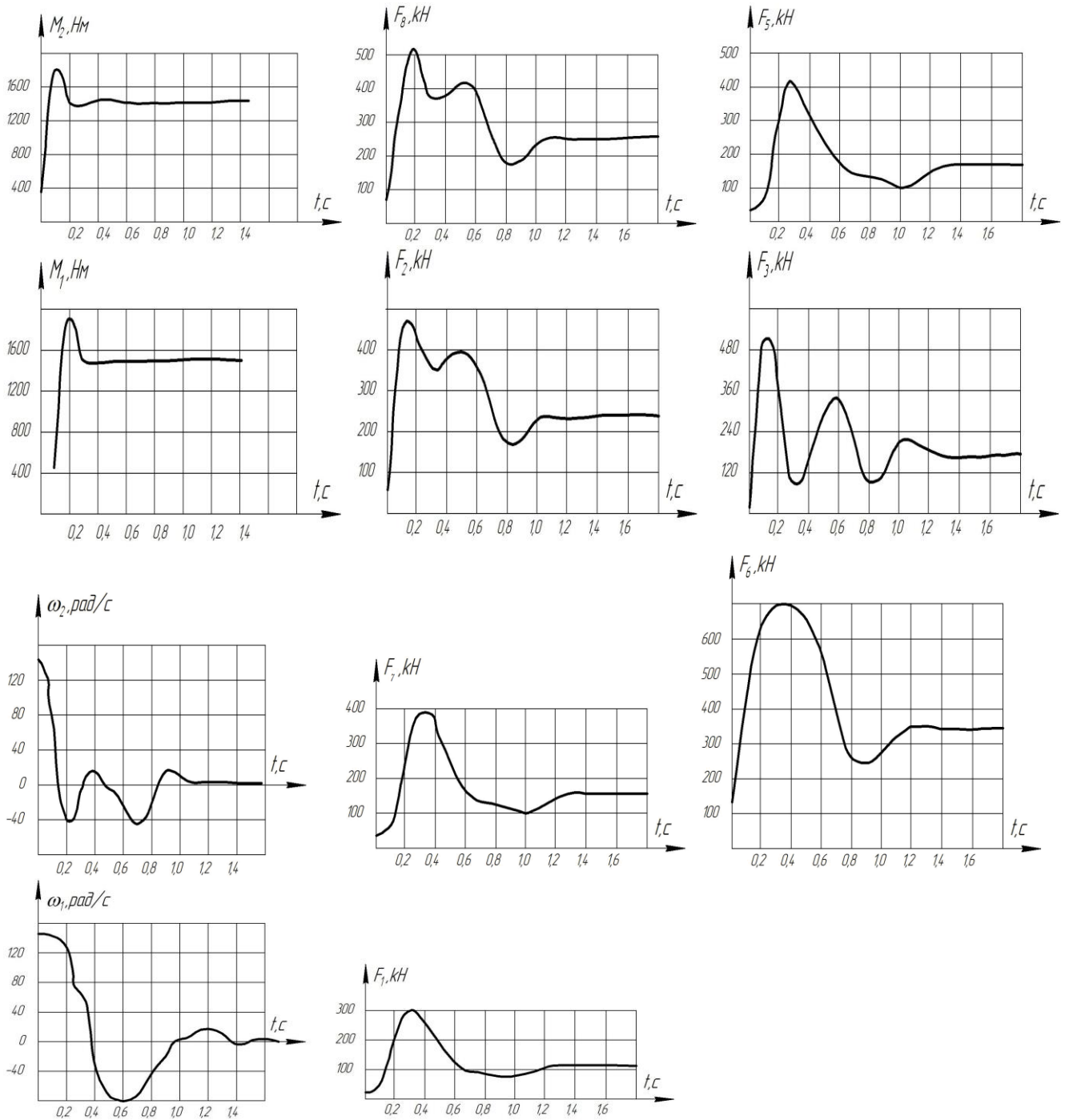
$$F_8 = \beta (M_{y2} + K_2 M_{y2}) = 75,2 \text{ кН} .$$

Приведенные графики характеризуют работу системы при стопорении исполнительного органа и взаимосвязи во времени различных параметров струговой установки. Момент на головном приводе достигает максимума за 0,05 с, а затем после спада стабилизируется на уровне 1470 Нм. На концевом приводе рост момента замедлен по сравнению с головным, максимум момента нарастает за 0,2 с, затем после спада также стабилизируется. Показателен характер изменения усилия в цепи у исполнительного органа. Если сравнивать график модели и эксперимента, то четко виден одинаковый характер изменения: тот же резкий рост усилия в начале стопорения до максимума, а затем спад и снова рост, после чего усилие снижается и снова растет до установившегося значения.

Результаты расчетов усилий в трансмиссии, моментов электродвигателей и их скоростей представлены на рис.11.

Усилие у исполнительного органа по экспериментальным данным составляет 511,8 кН, а на модели - 511,1 кН, время нарастания усилия соответственно 0,2 и 0,15 с; усилие в цепи у концевого привода по эксперименту 410 кН, а по модели - 398,1 кН, время соответственно 0,38 и 0,3с. Сравнение свидетельствует о соответствии программы результатам стендовых исследований. Количественные показатели других характерных участков также идентичны. Исключение составляют показатели минимального значения усилий у исполнительного органа и у концевого привода. В эксперименте минимум гораздо ниже, чем на модели. Однако по

времени минимум усилий и на модели, и в эксперименте совпадают. Достаточное совпадение и установившихся значений.



**Рис.11. Расчетные значения параметров при стопорении исполнительного органа**

Учитывая, что для расчетов экстремальных усилий необходимо знать их максимальную величину, можно говорить о возможности практического использования модели.

С помощью аналитического моделирования были получены необходимые при расчетах данные по формированию усилий на срезных элементах. Получение этих данных экспериментально, прямыми замерами практически невозможно. Для расчетов эти данные очень важны, так как позволяют судить об одновременности загрузки приводов и являются исходными для выбора цепи и самих срезных элементов. Анализ показывает, что даже при максимальной жесткости трансмиссии максимумы усилий на срезных элементах разнесены во времени. Следует указать, что в модели срезной элемент принят с заведомо завышенными прочностными свойствами, обеспечивающими прохождение экстремальных усилий. При усилиях 343 кН (тарировка на срез) на предохранительном элементе головного привода усилие на аналогичном элементе концевого привода составляет 60кН.

Интересен характер изменения, угловой частоты приводов. С момента начала стопорения идет резкое снижение скорости головного привода, в момент максимума усилия на головном приводе угловая частота равна нулю, затем меняется направление вращения, о чем свидетельствует изменение знака угловой частоты. Это подтверждает физическую сущность процесса, так как под действием накопленных усилий упругой деформации в рабочей ветви тяговой цепи редуктор проворачивается в противоположном направлении до тех пор, пока не реализуется часть усилия, обусловленную маховыми массами и разницей между критическими и пусковыми моментами привода. Максимальное значение усилия в цепи возле вспомогательного привода на модели составляет 395-400 кН (407 кН в эксперименте). Учитывая время стопорения, маховые массы привода и электромагнитный момент, развиваемый двигателем, можно определить максимальное усилие в цепи в момент стопорения исполнительного органа от одного привода - 270-330 кН. Остальная часть усилия обусловлена реализацией сил упругой деформации на рабочем участке цепи. С учетом потерь усилие в обратной ветви цепи возле головного привода составляет 300-310кН. Если суммировать усилия,



одновременно действующие на вал головного привода, при условии, что хоть один стык конвейерного става имеет раскрытый зазор, то общее усилие составит 700 кН.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований и математического моделирования подтверждают правильность построения модели и возможность ее использования в расчетах при проектировании. Максимальное усилие в основной ветви цепи при экстренном стопорении формируется усилием, соответствующим усилию среза предохранительного элемента на головной приводной станции и усилием, близким к номинальному значению, развиваемым концевой приводной станцией: в эксперименте 373 кН в основной ветви цепи и 54 кН во вспомогательной; расчетные соответственно 382 кН и 49 кН. В процессе стопорения исполнительного органа максимальные значения усилий на приводных станциях формируются неодновременно: в эксперименте разница во времени между максимальными значениями усилий составила 0,15 с, при срезе предохранительного элемента 0,04 с. Усилие на головной приводной станции возрастает до величины среза предохранительного элемента за 0,1 с, на концевой за 0,01 с, т.е. в 10 раз быстрее. Потери на перемещение исполнительного органа пропорциональны развиваемым тяговым усилиям. Режим стопорения является затухающим колебательным процессом с изменением направления вращения приводов. Результаты эксперимента показывают, что при сборке приводов на скорость 1,5 м/с в момент стопорения экстремальное усилие, без учета потерь, действующее на вал привода, равно 785 кН.

## **5.Создание и исследование регулируемого привода исполнительного органа**

### **5.1.Основные предпосылки создания регулируемого привода**

Основным вопросом развития приводных систем струговых установок является создание такого рода привода, который обеспечил бы рациональное использование силовых и энергетических параметров, заложенных в конструкции, и способствовал выбору режимов работы с максимальной производительностью в конкретных горно-геологических условиях. Этим требованиям отвечает регулируемый привод который позволяет реализовать на струговых установках следующее:

- повышение номинальной мощности электродвигателя на 30-35% за счет уменьшения числа включений в час в среднем с 50-60 до 20-30, снижения величины пускового тока с 7-9 кратного значения до 2-3 кратного от номинального значения;

- уменьшение энергоемкости привода струговой установок за счет выбора рационального режима резания угля в забое в конкретных горно-геологических условиях, снижение энергозатрат на погрузку угля на 15-20% при рациональном соотношении скоростей конвейера и исполнительного органа;

- повышение коэффициента машинного времени за счет ликвидации простоев, связанных с перегрузкой конвейера, путем реализации оптимального соотношения скоростей;

- повышение надежности привода за счет снижения числа включений в час, при этом расчетный срок службы изоляции электродвигателей при снижении числа включений в среднем с 50 до 30 в час увеличивается в 3,75 раза, а также за счет равномерного распределения нагрузок между приводами;

- снижение габаритов приводных станций как минимум на 20% за счет замены двухскоростных редукторов с коробкой передач на односкоростные;

- задание диаграммы скорости движения исполнительного органа, обеспечивающей надежность конечных операций, защиту привода и трансмиссии при его стопорениях на любом участке лавы без использования специальных средств защиты;

- повышение коэффициента использования установленной мощности электродвигателей с 0,6-0,75 до 0,95;

- повышение безопасности ведения ремонтных и профилактических работ, улучшение условий труда, снижение уровня шума от процессов частых пусков приводов с резкими динамическими ударами в трансмиссии.

Возможны два основных варианта решения проблемы по созданию регулируемого привода:

- создание частотно-регулируемого привода;

- создание регулируемого привода на базе электродвигателей постоянного тока.

## **5.2.Создание частотно-регулируемого привода**

Частотно-регулируемый привод предназначен для управления двумя приводными станциями струговой установки. Обычно приводы оснащаются асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями как с гидромуфтами, так и без них. Такая система привода обладает существенными недостатками, одними из которых является неравномерность распределения нагрузок между приводами. Это обусловлено естественным разбросом характеристики электродвигателей, различной величиной падения напряжения на соответствующих участках сети, различной жесткостью участков тяговой цепи и т.д., что приводит к неполному использованию установленной мощности электродвигателей.

Указанный недостаток может быть устранен с помощью частотно-регулируемого привода, т.к. для каждого электродвигателя имеется свой преобразователь частоты с отдельными панелями регулирования частоты и напряжения. Система автоматического регулирования (САР) двухдвигательного привода может быть построена по различным

принципиально схемам. Анализ существующих САР показал, что для струговых установок наиболее приемлемы являются две схемы:

- с общим каналом регулирования частоты и разделенными каналами регулирования напряжений;
- с разделенными каналами регулирования как напряжений, так и частот.

Схема САР с общим каналом регулирования частоты наиболее проста в эксплуатации, имеет меньшее количество элементов и, следовательно, более высокую надежность. Схема САР с разделенными каналами регулирования частоты значительно сложнее, но обладает лучшими регулировочными характеристиками. Для определения наиболее рациональной схемы САР проведены сравнительные стендовые исследования частотно-регулируемого привода.

#### **5.2.1. Исследование работы привода с системой авторегулирования с общим каналом регулирования частоты и разделенными каналами регулирования напряжений**

Система авторегулирования, схема управления преобразователями и система связи построены с использованием серийных унифицированных блоков систем регулирования: усилителей постоянного тока, датчиков напряжения, источников питания и др.

Данная структура регулирования позволяет поддерживать магнитный поток головного двигателя при регулировании частоты на выходе обоих преобразователей частоты от 2,5 до 75 Гц. Датчик скорости установлен у одного электродвигателя. В системе имеется один канал регулирования частоты и два канала регулирования тока. Основным узлом схемы является задатчик скольжения, который выполнен на усилителях постоянного тока. Сигнал на выходе пропорционален частоте тока ротора основного двигателя и ограничен по максимуму стабилитронами. Сигнал выхода подается на регулятор частоты и регуляторы тока. Выходной сигнал пропорционален

алгебраической сумме входных сигналов, поступивших от токогенератора и датчика скольжения, и ограничен по максимуму стабилизаторами.

Схема работает следующим образом. При холостом ходе двигателей величина сигнала на выходе датчика скольжения равна нулю, а сигналы, поступившие с датчиков тока, скомпенсированы напряжением смещения. Электродвигатели работают с номинальными магнитными потоками. Это равновесие не нарушается и при равномерной загрузке электродвигателей. Увеличение сигналов на выходе датчиков тока компенсируется увеличением сигнала на выходе датчика скольжения. Если концевой электродвигатель загружен больше головного, то сигнал на выходе датчика тока будет больше сигнала на выходе датчика скольжения, т.к. величина сигнала пропорциональна нагрузке головного электродвигателя.

Следовательно, напряжение на концевом двигателе будет меньше номинального для заданной частоты тока статора, что приводит к уменьшению магнитного потока и увеличению скольжения. Это будет продолжаться до тех пор, пока нагрузки электродвигателей не станут равными. Если нагрузка головного электродвигателя не увеличивается, то магнитный поток его не изменится, т.к. сигналы на выходе компенсируются сигналом на выходе датчика скольжения. Магнитный поток концевой электродвигателя увеличится, т.к. сигнал на выходе датчика скольжения больше сигнала на выходе датчика тока, что приводит к уменьшению скольжения и таким образом выравниванию нагрузок.

**Условия исследований.** Исследования проводились на полнометражном стенде со струговой установкой отрывного действия длиной 40 м. В качестве обрабатываемого материала был использован углещементный блок длиной 19 м. На приводах исполнительного органа были установлены два электродвигателя суммарной мощностью 160 кВт. Давление в системе подачи поддерживалось постоянным. Передаточное число редукторов струговой установки 25,01. Диаметр начальной окружности приводных звезд 0,332 м.

В процессе исследований производилось измерение активной мощности, потребляемой каждым электродвигателем. Определялась зависимость активной мощности от частоты, линейного тока, напряжения, моментов на выходных валах редукторов, скорости вращения двигателей. Все измеряемые параметры регистрировались. Схема измерений приведена на рис.12. Исследование производилось при трех скоростях движения исполнительного органа, что достигалось изменением скорости вращения электродвигателей, т.е. установкой соответствующей частоты выходного напряжения (75 Гц, 50 Гц, 30 Гц).

Результаты, полученные после обработки экспериментальных данных, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

**Средние значения активной мощности и моментов на валах электродвигателей головного и концевого приводов**

№ участка	Головной электродвигатель		Концевой электродвигатель	
	М <sub>03</sub> Нм	Р <sub>0</sub> кВт	М <sub>03</sub> Нм	Р <sub>0</sub> кВт
1	276	46,4	66	25,3
2	322	64,5	42,2	28,3
3	459	56	53	24,5
4	310	55,8	59	28
5	279	48	82,5	29,3
6	220	39,6	102	32
7	268	44,5	137	46,3
Среднее	304,86	50,69	77,4	30,5

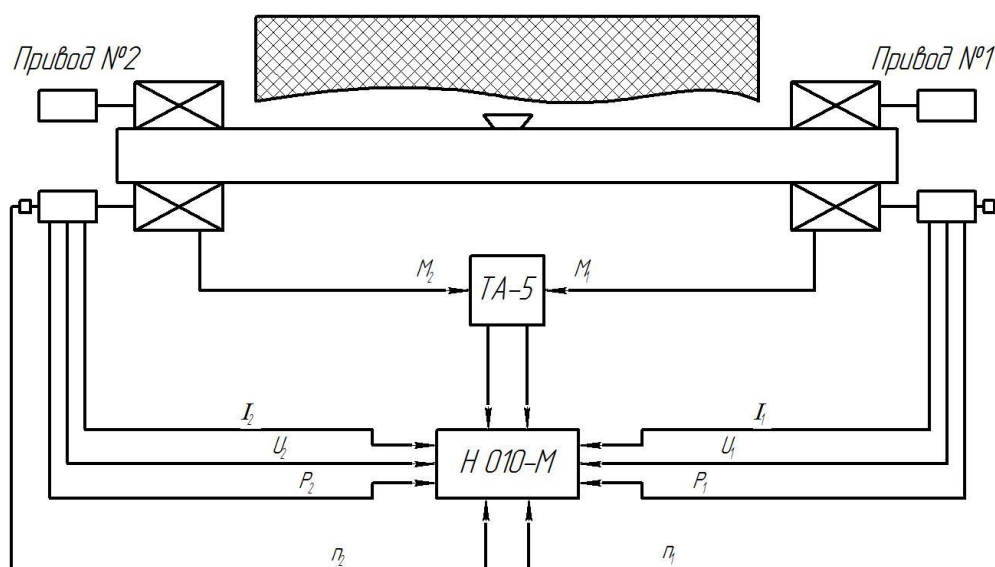


Рис.12.Схема подключения измерительной аппаратуры для измерений параметров частотно-регулируемого привода

Анализ, полученных данных показывает, что схема САР с общим каналом частоты и разделенными каналами регулирования напряжений (регулирование загрузки изменением магнитного потока электродвигателя) является неэффективной, т.к. время выравнивания нагрузок более 7 с, а коэффициент полезного действия электродвигателя с увеличением магнитного потока уменьшается в два раза.

### **5.2.2. Исследование работы привода с системой авторегулирования с разделенными каналами регулирования частот и напряжений**

Схема отличается от предыдущей тем, что имеет два узла задатчика скольжения. Это дает возможность регулирования на выходе каждого преобразователя частоты, а, следовательно, и скорости вращения как головного электродвигателя, так и концевой при неизменных магнитных потоках. Датчики скорости установлены на валах обоих электродвигателей. Работа обособленной системы регулирования каждым преобразователем частоты аналогична работе системы головного электродвигателя по предыдущей схеме. Между системами регулирования двигателей существует прямая связь по частоте и напряжению. При получении сигнала о рассогласовании нагрузок приводов система производит их выравнивание.

Исследования привода с такой схемой САР производились в тех же условиях, что и в предыдущем случае.

Результаты, полученные после обработки экспериментальных данных, приведены в табл.5.2.

Анализ полученных данных показывает, что максимальная разность средней нагрузки приводов наблюдается на участке 1, т.е. на первой секунде работы привода по окончании пуска и составляет 94 Нм. При этом электродвигатель концевой привода в 1,34 раза загружен меньше головного в 1,34 раза. На всех остальных участках коэффициент загрузки колеблется от 1,3 в обе стороны, т.е. больше загружен то головной, то концевой привод. В среднем за один проход исполнительного органа коэффициент неравномерности по мощности, потребляемой электродвигателями,

составляет 1,12. При этом большая мощность потребляется головным приводом.

Таблица 5.2.

**Средние значение активной мощности и моментов на валах электродвигателей головного и концевого приводов.**

№ участка	Электродвигатель привода			
	Головного		Концевого	
	М <sub>0</sub> Нм	Р <sub>0</sub> кВт	М <sub>0</sub> Нм	Р <sub>0</sub> кВт
1	370	111,8	276	77,3
2	259	89,3	268	79,1
3	284	98,3	274	83
4	337	111	295	89
5	294	101	341	92,2
6	288	94,2	327	93,8
7	387	121	368	101,2
Среднее	317	103,9	307	87,9

Сравнение результатов, полученных при исследованиях привода с САР, выполненной по схеме с общим и отдельными каналами регулирования частоты показывает, что последний обладает существенными преимуществами.

Анализ динамических процессов привода показывает, что с уменьшением скорости увеличивается разность между коэффициентом вариации момента на валу электродвигателя головного привода и коэффициентов вариации активной мощности, потребляемой этим электродвигателем. Так, при работе установки с максимальной скоростью отношение коэффициента вариации мощности к коэффициенту вариации момента составляет:

$$\frac{46,7}{44,7} = 1,04.$$

При работе с минимальной скоростью:



$$\frac{80}{40,9} = 1,95.$$

Известно, что кинетическая энергия, запасенная вращающимися массами привода, пропорциональна квадрату скорости. В соответствии с этим уменьшение коэффициента вариации активной мощности при работе на повышенной скорости говорит о лучшем использовании маховых масс привода при преодолении максимальной нагрузки. Это подтверждается и коэффициентом вариации скорости электродвигателя головного привода, который изменяется от 6,1 до 1,5% при работе привода на частоте 31 и 72 Гц соответственно.

Для выявления влияния вносимых САР частот был произведен спектральный анализ моментов на валах электродвигателей головного ( $M_2$ ) и концевого ( $M_1$ ) приводов, а также активных мощностей соответственно  $P_2$  и  $P_1$ .

Анализ энергетического спектра частот показал, что частота, вносимая САР, не оказывает существенного влияния на энергетический спектр исследуемых процессов.

### **5.2.3. Исследование работы серийного электродвигателя в режиме стопорения**

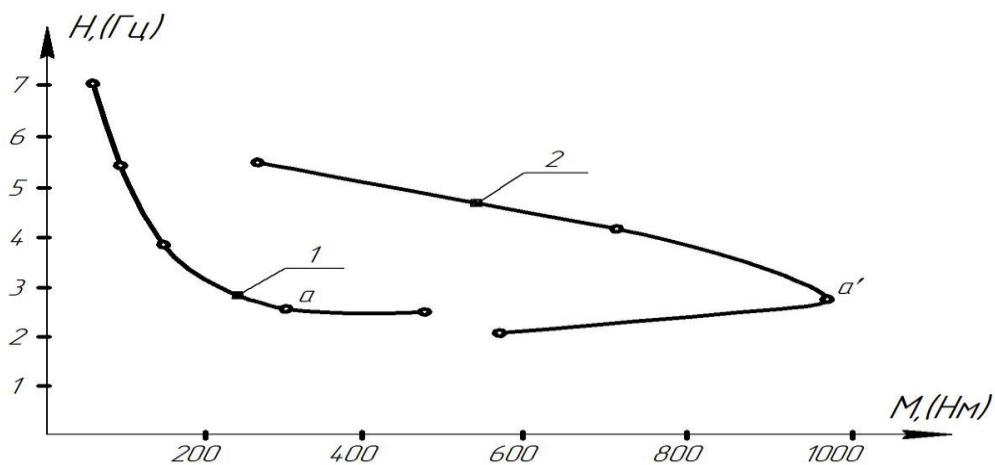
Электродвигатель в системе частотно-регулируемого привода, работает в режиме переменной частоты питающего напряжения несинусоидальной формы. Величина максимального момента при неизменном потоке (регулируется по закону  $\frac{E}{f} = \text{const}$ ) во всем диапазоне рабочих частот остается постоянной.

Установлено, что при стопорении исполнительного органа наблюдается резкое уменьшение момента электродвигателя. Для определения фактических значений величины момента были проведены специальные исследования. Они проводились в два этапа: в режиме короткого замыкания и режиме стопорения.

Исследования работы электродвигателя в режиме короткого замыкания проводились на нагрузочном стенде, состоявшем из электродвигателя и редуктора струговой установки с передаточным отношением  $i=25,01$ . Выходной вал редуктора жестко застопорен. Опыты проводились в следующем порядке: регулятором частоты (РЧ) устанавливались последовательно частоты: 2; 2,5; 4 и 6 Гц, а регулятором тока (РТ) автоматически поддерживались величина тока двигателя.

В каждом опыте производились измерения линейного тока двигателя ( $I$ ), линейного напряжения ( $V$ ), активной мощности, потребляемой электродвигателем ( $P_c$ ), момента на выходном валу редуктора ( $M$ ), частоты питающего напряжения ( $f$ ). Измеряемые параметры регистрировались. По результатам исследования после обработки экспериментальных данных построена зависимость максимального момента на валу двигателя от частоты питающего напряжения при постоянном значении тока двигателя (рис.13. кривая 1).

Исследования электродвигателя на нагрузочном стенде с целью определения моментальных характеристик при питании тока низкой частоты (режим стопорения) проводились при заклиненном валу редуктора через отрезок тяговой цепи длиной 35 м в следующем порядке. Предварительно регулятором частоты устанавливались последовательно те же значения частоты : 2; 2,5; 4;5;6 Гц, а регулятором тока автоматически поддерживалась минимальная величина тока двигателя  $I=320$  А. В каждом опыте, как и при исследовании в режиме короткого замыкания, производились измерения тех же параметров, и, кроме этого, скорости вращения двигателя ( $n$ ). При пуске за счет того, что тяговая цепь струговой установки была не натянута, двигатель успевал развить номинальную скорость, соответствующую заданной частоте, без нагрузки. По мере натяжения цепи рос момент сопротивления на валу двигателя и при моменте большем момента, развиваемого двигателем, он "опрокидывался".



**Рис.13. Зависимость момента на валу электродвигателя от частоты питающего напряжения при  $I_{дв}=2 I_{н}=32СА$  и  $S=1$  (кривая 1) и  $S<E$  (кривая 2).**

При этом регистрировался максимальный момент, развиваемый двигателем, а также величина критического скольжения. По результатам экспериментов построена зависимость максимального момента от частоты питающего напряжения  $M_{max}=F(f)$  при постоянном токе  $J=const$ . (кривая 2 на рис.13.).

Анализ полученных данных показывает, что при частотном регулировании скорости двигателя и соблюдении закона  $\frac{E}{f} = const$ , т.е. с постоянным магнитным потоком во всем диапазоне рабочих частот, обеспечивается постоянство заданного максимального момента (экскаваторная характеристика привода), за исключением точки, соответствующей режиму короткого замыкания двигателя, т.е. при скольжении  $S=1$ . Как видно на рис.13, максимальный момент, развиваемый двигателем при скольжении меньше единицы, в три раза больше, чем в режиме короткого замыкания. Это явление можно объяснить следующим образом.

Минимальная частота макетного образца частотно-регулируемого привода была выбрана из условия максимального использования установленной мощности (300 кВА), при работе привода на частоте 75 Гц. Момент двигателя на рабочем участке характеристики определяется

величиной скольжения или, что равнозначно, величиной частоты тока ротора. Для двигателя, работающего на естественной характеристике ( $f=50\text{Гц}$ ), моменту равному  $2M_n$  ( $1050\text{ Нм}$ ) соответствует скольжение  $S=0,05$ , или частота тока ротора:

$$f_2 = f_1 \cdot S = 50 \cdot 0,05 = 2,5\text{Гц}$$

При частотном регулировании скорости двигателя, одной и той же величине момента, развиваемого двигателем, соответствуют разные величины скольжения. Так, для этого же двигателя, работающего на частоте  $75\text{ Гц}$ , той же величине момента будет соответствовать скольжение:

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{2,5}{75} = 0,0333.$$

При этом полная мощность, потребляемая двигателем, будет равна:

$$N = \frac{106 \cdot 2250 \cdot (1 - 0,0333)}{975 \cdot 0,91 \cdot 0,856} = 300\text{кВА}.$$

При работе на номинальной частоте  $2,5\text{ Гц}$  электродвигатель должен развивать момент  $2M_n$  при скольжении:

$$S = \frac{2,5}{2,5} = 1.$$

Такое скольжение соответствует режиму короткого замыкания двигателя, т.е. режиму, когда противоЭДС равна 0. При работе двигателя на естественной характеристике и скольжении  $S=1$  частота ротора:

$$f_2 = S \cdot f_1 = 1 \cdot 50 = 2,5\text{Гц}.$$

Так как ротор в используемом двигателе имеет глубокие пазы приведенное активное сопротивление ротора будет значительно больше при  $50\text{ Гц}$ , чем при  $2,5\text{ Гц}$  в режиме короткого замыкания. Известно, что пусковой момент прямо пропорционален активному сопротивлению в цепи ротора асинхронного электродвигателя. Следовательно, пусковой момент электродвигателя, работающего на частоте меньше номинальной, будет всегда меньше номинального пускового. Это и подтвердили проведенные эксперименты.

Исследования позволили сделать следующие выводы и рекомендации:

- для струговых установок с частотно-регулируемым приводом наиболее эффективной схемой авторегулирования является схема с разделенными каналами регулирования частот и напряжений;

- максимальный момент, развиваемый электродвигателем, при регулировании его скорости изменением частоты питающего напряжения и неизменном магнитном потоке остается неизменным во всем диапазоне регулирования; пусковой момент прямо пропорционален частоте тока статора;

- в системах управления необходимо применять задатчики частоты, имеющие линейные выходные характеристики.

#### **5.2.4. Стендовые исследования макетного образца частотно-регулируемого привода**

Макетный образец частотно-регулируемого электропривода струговой установки был выполнен на базе автономного инвертора напряжения с явно выраженным звеном постоянного тока.

Ниже приведена техническая характеристика преобразователя частоты и нагрузочного агрегата макетного образца.

Преобразователь частоты питается от силового трансформатора мощностью 320 кВА.

Схема и группа соединения - 6000/660 В.

В качестве управляемых и неуправляемых вентилях использовались соответственно вентили 200-8 кл и 200-10 кл (по два последовательно соединенных вентиля в плече).

Параметры входного фильтра:

1. Емкость набрана из электролитических конденсаторов 480 В., 500 мкФ., соединенных по четыре последовательно; общая емкость фильтра - 3500 мкФ; индуктивность дросселя - 2,2 мГн, зазор - 5 мм.

2. Величина междуфазовой коммутирующей емкости составляет 6х65 мкФ, конденсаторы 1000 В., 4 мкФ, соединенные в группы по два последовательно.

3. Коммутирующие дроссели изготовлены с разомкнутым железным сердечником, сечение медного провода  $120 \text{ мм}^2$ , индуктивность  $L_k=0,79 \text{ мГн}$ . В качестве дросселей насыщения использованы тороидальные сердечники сечением  $6 \text{ см}^2$  с числом витков - 10. Для подзарядки коммутирующих емкостей используются трансформаторы 40 кВа, 6000/660 в, источники подзарядки подключаются к инвертору через последовательно соединенные диоды ВК-2-10 и активные сопротивления  $200 \text{ ом}$ ,  $5 \text{ а}$ . Сопротивление в цепи обратного моста по  $0,45 \text{ ом}$ ,  $75 \text{ а}$ .

Данные машин нагрузочного агрегата:

1. Асинхронный электродвигатель:  $P_{\text{НОМ}}=80/115 \text{ кВт}$ ;  $U_{\text{НОМ}}=660 \text{ в}$ ,  $I_{\text{НОМ}}=89/124 \text{ а}$ ;  $\eta=91,8 \%$ ;  $\cos \varphi=0,856/0,884$ ,  $n_{\text{НОМ}}=1475/1465 \text{ об/мин}$  ;  
 $I_{\text{пуск}}=700 \text{ а}$ ;  $M_{\text{пуск}}=1500 \text{ Нм}$ ;  $M_{\text{max}}=1950 \text{ Нм}$ ;  $P_{\text{НОМ}}=110 \text{ кВт}$ ,  
 $U_{\text{НОМ}}=230 \text{ в}$ ;  $I_{\text{НОМ}}=478 \text{ а}$ ;  $n_{\text{НОМ}}=1500 \text{ об/мин}$ . Генератор замкнут на активное сопротивление  $0,5 \text{ ом}$ ,  $775 \text{ а}$ .

2. Таходинамо:  $E_{\text{я}}=35 \text{ в}$ ;  $n=1500 \text{ об/мин}$ ;  $U_{\text{возб.}}=110 \text{ в}$ ;  $r_{\text{я}}=140 \text{ ом}$ . Частота преобразователя определялась частотомером .

Нагрузка асинхронного двигателя изменялась регулированием возбуждения генератора постоянного тока. С целью обеспечения запаса по напряжению при повышении частоты до  $75 \text{ гц}$  и поддержания заданного закона частотного управления  $\frac{E}{f} = \text{const}$  электросхема двигателя переключена со звезды на треугольник.

Для защиты от коротких замыканий и прорыва инвертора был применен блок защиты совместно с быстродействующими предохранителями на  $250 \text{ а}$ . Последние установлены в каждом плече выпрямительного моста преобразователя.

Блок защиты выполнен на логических элементах и воздействует при срабатывании на систему управления выпрямителем преобразователя, снимая импульсы с последнего при срабатывании.

Блок защиты 2-х модульный, имеет на передней панели две кнопки "сброс" и "запуск", а также сигнальную лампу. Кнопка "запуск" позволяет включить преобразователь после аварийного режима. Загорание лампы сигнализирует о включении блока защиты.

Для замера параметров двигателя (переменного напряжения, мощности и тока регулируемой частоты) использовался измерительный комплект с трансформатором тока, поскольку другие типы приборов дают большую погрешность при низких частотах порядка  $5 \div 10$  Гц.

Реверсирование асинхронного двигателя осуществлялась с помощью контактора. Преобразователь частоты обеспечивал частотный пуск с помощью тахогенератора, регулирование скорости двигателя в диапазоне 1:15 и частотное торможение.

В канале регулирования частоты отрицательная и положительная связи подбираются таким образом, чтобы частота на выходе инвертора не зависела от нагрузки, т.е. система должна быть астатической по частоте (но не по скорости). Исходя из условия формирования экскаваторной характеристики с предельным моментом, равным или несколько большим  $2 M_n$  и номинальным скольжением  $S_{ном} = \frac{1500 - 1475}{1500} \cdot 100\% = 1,67\%$  необходимо обеспечить (из условия поддержания потока  $\Phi = \Phi_{ном} = const$ ) минимальную частоту преобразователя соответствующую  $2 M_n$  и равную 1,7 Гц. Поскольку нижний предел частоты преобразователя, обеспечиваемый выбранным задатчиком частоты, значительно выше частоты, соответствующей двухкратному номинальному скольжению двигателя, минимальная частота преобразователя (5Гц) задается от отдельного источника питания, а пуск привода от частоты 5Гц происходит с постоянным скольжением (и, следовательно, моментом), определяемым предельным выходным значением сигнала задатчика скорости (5Гц) т.е.:

$$U_{рч} = U_{зс} \cdot \frac{R_{ос}}{R_{вх}} = 8 \frac{24}{762} = 0,25(в),$$

где  $U_{zc} = 8\text{В}$  - максимальное напряжение датчика скорости,  
 $R_{oc} = 24\text{ кОм}$  - сопротивление обратной связи регулятора частоты,  
 $R_{вх} = 680 + 82 = 762\text{ кОм}$  - входное сопротивление регулятора частоты.

В контуре регулирования тока совмещены функциональный преобразователь и собственно регулятор тока. Линеаризованная функция  $I_1 = F(\omega_2)$  для случая поддержания  $\Phi = \text{const}$  реализуется с помощью сигналов  $\omega_2$  от ЗС и  $U_{cm}$  и сравнивается с истинным значением тока  $I_1$ .

Для получения необходимой жесткости механической характеристики двигателя на рабочем участке, то есть поддержания на этом участке потока  $\Phi = \text{const}$ , и ограничения максимального значения тока статора  $I_1$  на регулятор тока заводится нелинейная обратная связь по току двигателя, а в цепь сигнала с датчиком скорости с помощью стабилитрона вводится ограничение сигнала  $\omega_2$ .

Для компенсации ЭДС вращения асинхронного двигателя на регуляторе тока через датчик напряжения регулятора тока подается сигнал пропорциональный угловой частоте статора  $\omega_1$ . Сигнал с выхода регулятора тока подается на корректор напряжения. Корректор напряжения предназначен для последующего введения отрицательной обратной связи по напряжению выпрямителя (из-за мягкости внешней характеристики последнего).

В описанной системе регуляторы тока и напряжения собраны на пропорциональных усилителях. Это приводит к резкому росту силы тока в момент подачи питающего напряжения.

Исследования частотно-регулируемого привода на нагрузочном стенде проводились с целью определения электрических и механических параметров. Привод исследовался в комплекте с электродвигателем и нагрузочным генератором с устройством, позволяющим измерить крутящий момент на валу электродвигателя.

Номинальные данные электродвигателя:



Мощность, кВт	-80.
Напряжение линейное, в	-380.
Соединение фаз	-треугольник.
Ток статора линейный, а	-160.
Коэффициент мощности	-0,856.
Коэффициент полезного действия	-0,918.
Скорость вращения, об/мин	-1475.
Ток пусковой линейный, а	-1210.
Момент пусковой, Нм	-1500.
Момент максимальный, Нм	-1950.

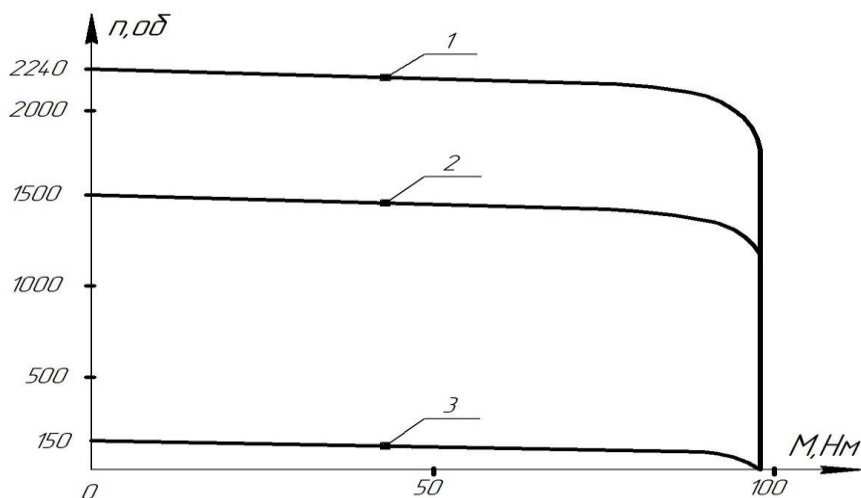
При исследованиях производились измерения активной мощности, потребляемой преобразователем частоты от сети, мощности потребляемой электродвигателем от преобразователя частоты, а также линейного тока и напряжения. Нагрузка на валу электродвигателя изменялась регулированием напряжения возбуждения генератора. Так как нагрузка на валу электродвигателя зависит от скорости вращения, то момент двигателя при стопорении определялся замером параметров при стопорении струговой установки на углеродном блоке. Скорость вращения двигателя измерялась с помощью тахогенератора и тахометра.

Все вышеуказанные параметры записывались приборами, а электрические параметры измерялись, кроме того, с помощью специальных измерительных комплектов.

Исследования проводились на частоте 75, 50 и 35 гц. По их результатам построены механические характеристики привода для различных частот (рис.14).

Анализ полученных результатов показал, что данная система позволяет получать экскаваторные характеристики привода с заданной перегрузочной способностью, при увеличении частоты до 75 Гц, т.е. в 1,5 раза больше номинальной, серийный электродвигатель может работать в таких условиях при этом его мощность увеличивается в 1,3 раза. При номинальной нагрузке

для частоты  $f=75$  гц КПД двигателя равен 0,9, потери в преобразователе составили 26,5 %, общий КПД системы равен 0,66,  $\cos \varphi = 0,7$ .



**Рис.14. Механические характеристики электродвигателя, полученные при испытаниях:**

- 1- для частоты =75 Гц
- 2- для частоты =50 Гц
- 3- для частоты =5 Гц

Регулирование напряжения производилось по закону  $\frac{E}{f} = const$ . Но, учитывая мягкость характеристики выпрямителя и увеличение потерь в преобразователе частоты с ростом нагрузки, начальное напряжение на двигателе для  $f=75$  гц несколько завышено,  $U_{дв}=676$  в. При переходе на другую частоту требуется корректировка напряжения выпрямителя т.к. система авторегулирования электропривода не учитывает нелинейность.

### **5.2.5. Стендовые исследования частотно-регулируемого привода струговой установки**

Привод исследовался на стенде в комплекте со струговой установкой, длиной 40 м. В качестве строгаемого материала был использован углцементный блок длиной 24 м. Струговая установка оборудована двумя приводными станциями.

Техническая характеристика приводной станции.

Редуктор:

Передаточное число

25,01

Диаметр приводной звезды, м	0,332
Электродвигатель:	
Напряжение, в	380
Номинальная мощность, кВт	32
Номинальный ток, а	63
Коэффициент полезного действия, %	90
Коэффициент мощности	0,86
Отношение максимального момента к номинальному	2,2
Отношение пускового тока к номинальному	6
Скорость вращения, об/мин	1460

Оба двигателя исполнительного органа питались от одного преобразователя частоты. Системой авторегулирования была сформирована "экскаваторная" характеристика привода со следующими параметрами:

Максимальная скорость, м/сек	1,5 (75 Гц)
Минимальная скорость, м/сек	0,1 (5 Гц)
Закон регулирования	$\frac{E}{f} = const$
Перегрузочная способность привода по моменту	2
Максимальный ток на выходе преобразователя частоты, а	380

Исследования проводились при постоянном давлении в системе подачи на забой 2,50 МПа.

При исследованиях производились измерения общей мощности на выходе преобразователя частоты и отдельно, потребляемой каждым электродвигателем; мощности, потребляемой преобразователем частоты от сети. Проводились измерения крутящего момента на выходном валу каждого редуктора, скорости движения исполнительного органа, число оборотов электродвигателя, напряжения и общего тока на выходе преобразователя частоты.

Общая мощность и мощность потребляемая каждым электродвигателем регистрировалась приборами. Крутящий момент

измерялся с помощью тензометрических датчиков, скорость движения исполнительного органа измерялась при помощи датчиков скорости. Скорость вращения электродвигателя измерялась с помощью тахогенератора.

Схема подключения измерительной аппаратуры приведена на рис.15.

Результаты стендовых исследований после обработки экспериментальных данных приведены в таблице 5.3.

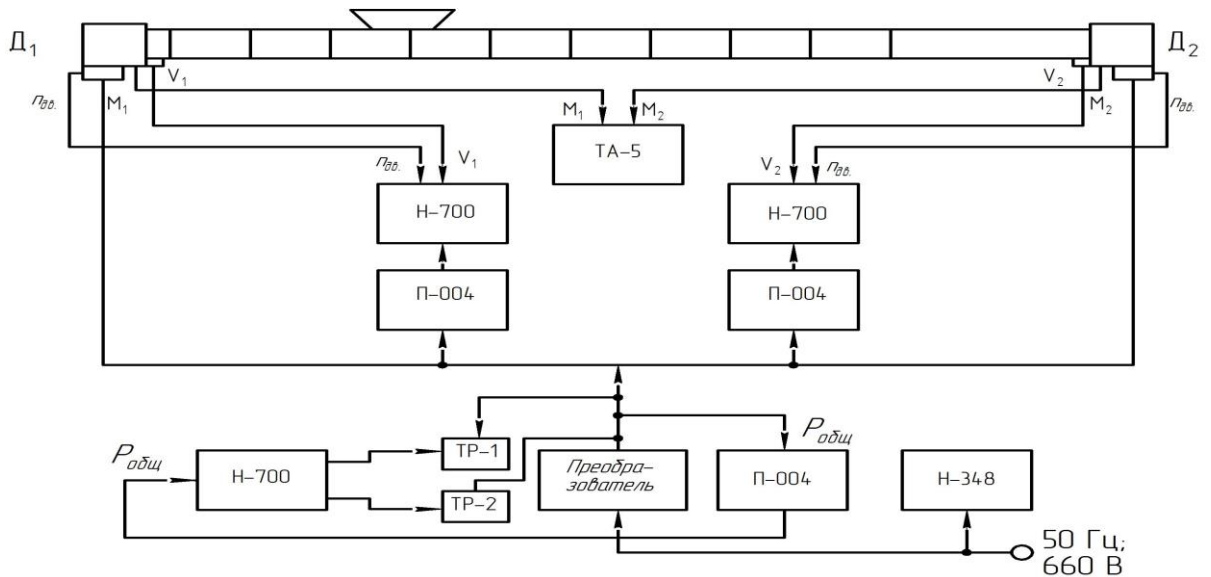
Были проведены исследования работы привода при экстренном стопорении исполнительного органа струговой установки. Результаты этих исследований приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.3.

### Результаты обработки исследований регулируемого привода

№ п / п	На выходе ПЧ			Электродвигатель №1				Электродвигатель №2			Мощность потребляемая от сети, P <sub>c</sub> , кВт	КПД ПЧ η, %	Примечание
	P <sub>0</sub> , кВт	U <sub>л</sub> , в	I <sub>л</sub> , а	P <sub>1</sub> , кВт	n <sub>1</sub> , об\мин	M <sub>1</sub> , Нм	V <sub>1</sub> , м\сек	P <sub>2</sub> , кВт	M <sub>2</sub> , Нм	V <sub>2</sub> , м\сек			
1	150	577	235	73,3	2160	314	1,49	76,3	288	1,46			f=75Гц
2	107	606	170	61,6	2160	240	1,49	45,4	217	1,5			
3	107	643	133	64,8	2170	212	1,5	42,2	165	1,51			
4	73	689	104,6	33,9	2180	96	1,51	39,1	178	1,51			
	109,2	628	160,5	58,4	2170	216	1,5	50,8	213	1,5			средние за 1 проход струга в установившемся режиме
	96,4										122,3	79	за 1 проход струга с учетом пуска

Анализ полученных результатов показывает, что данная система привода струговой установки работоспособна и обеспечивает: плавный разгон исполнительного органа до номинальной скорости; диапазон регулирования скорости 1:15; получение "экскаваторных" характеристик привода во всем диапазоне регулирования скорости; ограничение пусковых токов до заданной величины



**Рис.15.Схема подключения измерительной аппаратуры.**

- 1.Частотно-регулируемый привод струговых установок работоспособен.
- 2.Серийные электродвигатели могут работать на повышенной частоте (75 Гц), при этом мощность их увеличивается на 30%.
- 3.Система автоматического регулирования обеспечивает получение экскаваторных характеристик в диапазоне частот от 5 до 75 Гц.
4. При пуске, а также при стопорении исполнительного органа (внезапном снижении скорости от максимальной до нуля) ток электродвигателей не превышает  $3 I_n$ .
5. Загрузка электродвигателей, также как и при нерегулируемом приводе, при работе от одного преобразователя частоты неравномерна.

$$\text{Отношение } \left| \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right| \text{ колеблется в пределах } 0,1 \div 0,25$$

**Результаты обработки стендовых исследований регулируемого привода**

№ п/п	На выходе ПЧ			Электродвигатель №1				Электродвигатель №2			Мощность потребляемая ПЧ от сети, P <sub>c</sub> , кВт	КПД ПЧ $\eta$ , %	Примечание
	P <sub>0</sub> , кВт	U <sub>л</sub> , В	I <sub>л а</sub>	P <sub>1</sub> , кВт	n <sub>1</sub> , об/мин	M <sub>1</sub> Нм	V <sub>1</sub> м/сек	P <sub>2</sub> , кВт	M <sub>2</sub> Нм	V <sub>2</sub> м/сек			
1	221	544	336	107,6	2072	338	1,43	113,4	420	1,36			75 гц
2	218	541	335	113,8	2052	444	1,42	104,2	422	1,42			Параметры привода при стопорении струга
3	218	535	335	110	2059	423	1,424	108	430	1,414			
4	210	522	352	115	2049	412	1,42	95	410	1,37			
5	208	503	360	106	2014	423	1,39	102	447	1,36			
6	190	463	384	99,8	1969	430	1,36	90,2	433	1,39			
7	156	406	384	81,2	1839	440	1,27	74,8	442	1,28			
8	120	344	384	59,6	1620	440	1,12	60,4	445	1,21			

**5.3.Создание регулируемого привода постоянного тока**

В ШахтНИУИ был проведен большой комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию регулируемого привода струговых установок на базе электродвигателей постоянного тока. В результате этих работ была спроектирована и изготовлена станция управления регулируемого привода постоянного тока исполнительного органа.

Станция управления регулируемого привода постоянного тока исполнительного органа струговой установки предназначена для питания и управления электродвигателей постоянного тока струговой установки. Станция управления обеспечивает также защиту привода в аварийных режимах.

Станция управления применяется в комплекте со следующим электрооборудованием:

- а) двумя электродвигателями постоянного тока;
- б) блоком управления;
- в) реле утечки постоянного тока;
- г) выносным пультом управления.

Станция управления выполнена в полном соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Станция управления может эксплуатироваться при следующих условиях:

- а) атмосферное давление 700-900 мм рт.ст.;
- б) температура окружающего воздуха - 5 + 35<sup>0</sup>С;
- в) относительная влажность воздуха до 95-98 % при 20<sup>0</sup>С ;
- г) допустимая вибрация станции управления частотой 25 Гц и ускорение до 0,7;
- д) наклоны в любую сторону от нормального положения до 15<sup>0</sup>;
- е) колебания напряжения сети в нормальном режиме работы от 85 до 110 % от номинального значения.

### **5.3.1. Основные технические данные станции управления**

Номинальное напряжение сети, в	660.
Частота сети, Гц	50.
Номинальный ток ввода, а	170.
Выпрямленное напряжение силовой цепи, в	100-900.
Выпрямленный номинальный, ток, а	до 200.
Выпрямленное напряжение цепи возбуждения, в	800 ÷ 160.
Номинальный выпрямленный ток возбуждения, а	40.
Напряжение искробезопасных цепей, в	18.
Напряжение цепей управления, в	127.
Напряжение цепей освещения и сигнализации, в	12,36.
Охлаждение тиристорного преобразователя	водяное, 2-х контурное.
Давление воды во внутреннем контуре, атм	1,2-1,3.

Давление воды во внешнем контуре, атм до 20.

Расход воды во внутреннем и во внешнем контурах, л/мин 10-17.

Допускается работа в кратковременном режиме с частотой включений 120 вкл/час, ПВ=25 % в течении 10 мин при включении и отключении  $3I_n$  и напряжении 700 в,  $\cos \varphi = 0,35 \pm 0,05$

Источник питания - трансформаторная подстанция.

Для питания струговой установки от подстанции до станции управления прокладывается гибкий кабель.

Максимально допустимая длина питающего кабеля составляет 240 м при условии номинального напряжения на трансформаторной подстанции 690 в.

Максимально допустимая длина питающего кабеля по условиям трехфазного короткого замыкания не ограничивается.

Тиристоры силовой цепи защищены параллельно включенными цепочками, "срезающими" пики коммутационных перенапряжений.

Управление тиристорами силовой цепи производится с помощью фазосмещающих устройств. На вход блока фазосмещающих устройств поступает шесть синусоидальных напряжений, сдвинутых друг относительно друга на  $60^\circ$  с амплитудой 16,7 в, сложенных с напряжениями смещения и управления.

Система сдвинутых друг относительно друга синусоидальных напряжений образуется на выходе синхронизирующего трансформатора. Напряжение смещения и управления реализуются на выходах соответственно блока питания и блока управления.

Блок питания состоит из трехфазного трансформатора на первичную обмотку которого подается напряжение 127 в. Вторичные шесть обмоток с различными вторичными напряжениями включены на выпрямительные трехфазные мосты, собранные на диодах и залитые эпоксидным компаундом.



Блок управления тиристорными преобразователями служит для осуществления плавного изменения напряжения до установленной с помощью потенциометра.

Для осуществления токовой отсечки в схеме блока управления применяются:

а) согласующие трансформаторы, питаемые от вторичных обмоток трансформаторов тока;

б) согласующие резисторы;

в) выпрямительный трехфазный мост;

г) сглаживающие емкости;

д) подстроечный потенциометр;

е) цепочки из последовательно включенных стабилитронов.

Станция управления позволяет снижать скорость движения исполнительного органа струговой установки при его подходе к концам рештачного става.

Снижение скорости исполнительного органа при его подходе к конечным положениям необходимо для четкого срабатывания конечных выключателей. Для ограничения скорости при его подходе к крайним положениям применяется снижение выходного напряжения преобразователя путем введения в заданной точке лавы сопротивления в цепь напряжения управления на входе усилителя. Таким сопротивлением является регулируемый резистор, который шунтируется нормально закрытыми контактами конечных выключателей, соединенными последовательно и расположенными в аппарате конечных операций на приводных станциях.

Преобразователь напряжения возбуждения предназначен для выпрямления и ступенчатого изменения выпрямленного напряжения, прикладываемого к реверсору, собранному на тиристорах, и далее к обмоткам возбуждения приводных двигателей струговой установки. Тиристорный преобразователь предназначен для преобразования

переменного напряжения 660 в и частотой 50 гц в постоянный ток, регулируемый напряжением от 100 до 800 в.

### **5.3.2. Стендовые исследования привода**

Стендовые исследования привода постоянного тока проводились в 2 этапа.

Первый этап – исследование привода на нагрузочном стенде. Эти работы проводились для отладки элементов привода при статическом нагружении и снятия характеристик холостого хода системы.

Второй этап - исследование привода на струговом стенде. На стенде привод исследовался со струговой установкой, разработанной ШахтНИУИ. Установка отрывного действия предназначена для выемки углей с сопротивляемостью резания до 300 кН/м на тонких пластах.

Общая длина установки на стенде - 40 м.

Длина углецементного блока 25 м. Углецементный блок имел сопротивляемость резанию 258 кНм. Исследования на струговом стенде проводились с 2-мя сборками приводных редукторов.

Первая сборка редукторов исполнительного органа с  $i_p=27,7$  соответствует скорости движения исполнительного органа 0,775 м/сек при скорости вращения электродвигателей 1460 об/мин.

Вторая сборка редукторов с  $i_p=14,1$  соответствует скорости движения исполнительного органа 1,5 м/сек при той же скорости электродвигателя.

При исследовании привода постоянного тока измерялись следующие параметры:

1. Активная мощность, потребляемая из сети переменного тока.
2. Тяговые усилия в цепи исполнительного органа.
3. Средняя скорость движения исполнительного органа.
4. Ток, потребляемый электродвигателями.
5. Напряжение на электродвигателях.
6. Ток возбуждения электродвигателей.

## 7. Напряжение на обмотках возбуждения электродвигателей.

Целью стендовых исследований струговой установки являлось:

- проверка работоспособности всех элементов привода постоянного тока при работе струговой установки отрывного действия;
- отработка схемы при работе привода в ручном и автоматическом режимах управления;
- определения нагрузки на приводах исполнительного органа как в установившемся, так и в переходных режимах;
- определение динамических свойств привода.

Исследования проводились в следующем порядке:

1. Исследования основных электромеханических блоков на нагрузочном стенде.

2. Исследования на струговом стенде при работе с струговой установкой в 2 этапа:

а) работа привода с передаточным числом редуктора  $i=27,7$ , что соответствует скорости движения исполнительного органа  $0,775$  м/сек при  $1460$  об/мин электродвигателя;

б) работа привода с  $i=14,1$ , что соответствует скорости движения исполнительного органа  $1,51$  м/сек при  $1460$  об/мин электродвигателя.

Основная задача этапа исследований на нагрузочном стенде состояла в опробовании и предварительной наладке систем питания и управления в режиме статического нагружения. На этом этапе были измерены значения параметров холостого хода, определена кривая намагничивания электродвигателей, а также параметры холостого хода станции управления электродвигателей.

В таблице 5.5. представлены результаты исследований на нагрузочном стенде

Таблица 5.5.

**Результаты исследований на нагрузочном стенде**

Наименование режима	$n_1$	$n_2$	$U_{\Sigma}$	$I_{\Sigma}$	$I_a$	$U_b$	$U_{гф}$	$P_{\approx}$
Холостой ход системы	1620	1280	885	17	38,4	80	394	18
Статическое нагружение системы	1490	1420	880	212	37,4	80	-	-
Статическое нагружение системы	1500	1420	885	175	37,4	80	-	-

Вначале была проведена наладка блока управления и аппарата конечных операций, затем была проведена проверка всех агрегатов на холостом ходу с непржатым к груде забоя рештачным ставом.

Нагружение привода производилось с помощью системы подачи. Давление в системе подачи устанавливалось 30 атм., 40 атм., и 50 атм. Основные опыты с нагружением производились при движении исполнительного органа в направлении головного привода. Цикл работы на стенде: разгон, строгание, замедление и остановка. При ручном управлении диаграмма работы задавалась соответствующим поворотом рукоятки регулятора скорости, при автоматическом управлении диаграмма задавалась аппаратом конечных операций и схемой управления.

Анализ результатов стендовых исследований показывает, что привод постоянного тока обеспечивает устойчивую работу установки на всех участках забоя. Момент вращения, создаваемый системой привода, обеспечивает достаточное усилие для строгания блока. Средняя стружка за проход исполнительного органа при различных усилиях системы подачи изменялась от 3,2 до 7 см. Максимальная мощность в установившемся режиме строгания составила 330 кВт при средней скорости движения 1 м/сек.

Характер изменения напряжений на якорях электродвигателей отражает изменение нагрузок на приводах исполнительного органа. При этом изменение скорости приводной звезды повторяет изменение напряжения на якоре электродвигателя.

Взаимосвязь этих параметров определена уравнением напряжений принятой двухдвигательной системы привода:

$$U = C_1 n_1 \Phi_1 + C_2 n_2 \Phi_2 + I(R_1 + R_2 + R_{др.}) + (L_1 + L_2 + L_{др.}) \frac{dI}{dt}, \quad (5.1)$$

где  $U$ - приложенное к якорям электродвигателей напряжение;

$C_{1,2}$ – электромагнитные постоянные электродвигателей;

$\Phi_{1,2}$ - потоки намагничивания электродвигателей;

$n_{1,2}$  - скорость электродвигателей;

$I$  - ток в якорной цепи электродвигателей;

$R_{1,2}$ - активное сопротивление якорных цепей электродвигателей;

$L_{1,2}$ -индуктивность якорных цепей.

Конструктивно электродвигатели выполнены с незначительными отклонениями параметров, поэтому можно считать:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi; \quad R_1 = R_2 = R; \quad L_1 = L_2 = L;$$

С принятыми допущениями уравнение (5.1) примет вид

$$U - 2I_R - 2L \frac{dI}{dt} = C_1 n_1 \Phi + C_2 n_2 \Phi. \quad (5.2)$$

Левая часть уравнения определяет состояние системы в целом, а в правой части сумма противоЭДС электродвигателей. Изменение каждого члена правой части уравнения отражает характер перераспределения напряжения. При изменении левой части уравнения в правой части могут изменяться только  $n_1$  и  $n_2$  при соблюдении принятых выше условий.

Таким образом, изменение скорости обусловлено перераспределением напряжений на электродвигателях.

Различие в значениях скорости электродвигателей в каждый момент времени обусловлено воздействием гибкой связи, какой является тяговая цепь исполнительного органа.

Результаты исследований показали, что при использовании привода постоянного тока по принятой схеме, можно получать практически равномерное распределение потребляемой мощности по приводам. Процесс

разгона установки (пусковой режим) протекает с плавным нарастанием скорости и не вызывает значительных различий в загрузке приводов.

На основании результатов стендовых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследования привода постоянного тока струговой установки показали его работоспособность. Струговая установка устойчиво работала на всех режимах нагружения.

2. Возможность плавного изменения скорости движения исполнительного органа практически исключает динамические нагрузки во всех элементах установки в пусковом режиме.

3. Последовательное соединение якорей электродвигателей системы управления позволяет получить равномерное распределение потребляемой мощности между приводами исполнительного органа.

4. Незначительная величина пускового тока (120 а), обусловленная наличием начального напряжения источников питания, не вызывает больших тепловых потерь, что особенно важно в условиях струговой выемки.

5. При номинальном напряжении системы возбуждения (80 в) привод обеспечивает расчетную скорость движения исполнительного органа в пределах нагрузки по току до  $1,5 I_n$  (при  $i_p=27,7$   $v=0,8-0,85$  м\сек).

6. Снижение скорости движения исполнительного органа в экспериментах с  $i_p=14,1$  обусловлено преждевременным срабатыванием системы форсирования напряжения возбуждения. Исследования показали, что возможна устойчивая работа всей системы привода в режиме перегрузки и при номинальном значении напряжения возбуждения.

7. Максимальные значения параметров, полученные при стендовых исследованиях:

тяговое усилие за проход блока - 19,1 т;

средняя скорость за проход блока - 1,05 м/сек.

При этом электродвигатели были перегружены по току в 2 раза.

8. Исследования показали работоспособность системы привода постоянного тока при ручном и автоматическом режимах управления.

9. Примененный серийный блок управления струговой установкой позволяет осуществлять все предусмотренные технологией выемки угля режимы управления.

10. С помощью аппарата концевых операций в режиме автоматического управления получена пятипериодная диаграмма скорости исполнительного органа.

11. Перераспределение нагрузок в системе привода вызывает перераспределение напряжений на якорях электродвигателей.

12. При резко выраженном характере колебаний моментов сопротивления на валах приводных звезд исполнительного органа колебания электрических параметров, определяющих потребляемую мощность, менее динамичны.

### **5.3.3. Шахтные исследования струговой установки с приводами постоянного тока**

Исследования проводились на шахте, разрабатывающей пласт мощностью 0,65 м с прослоем глинистого сланца 0,05-0,1 м, сопротивляемостью угля резанию в целике 279-315 кН/м. В почве и кровле пласта песчаный сланец.

#### **Техническая характеристика струговой установки СН2620 с приводами постоянного тока**

Производительность струговой установки, м <sup>2</sup> /мин	5,7.
Мощность пласта, м	0,65.
Угол падения, град.	до 20°.
Сопротивляемость угля резанию, кН/м	до 300.
Тип исполнительного органа	скользящий.
Глубина захвата, м	до 0,07.
Тяговый орган	цепь круглозвенная 26 х 99, с. разрывным усилием 980 кН.

Скорость движения исполнительного органа, м/с	0-1,28; 0-1,56.
Количество приводных станций, шт	2.

### **Электродвигатель**

Мощность, кВт	56/75.
Напряжение якоря, В	440.
Ток якоря, А	
длительный	140.
часовой	190.
Возбуждение	независимое.
Напряжение возбуждения, В	80.
Ток возбуждения, А	10.
Частота вращения, об/мин	1200.
Охлаждение	водяное от противопожарного трубопровода.
Габариты, мм	1150x720x520.
Масса, кг	1360.
Двигатели включены последовательно соответственно по цепям якоря и возбуждения.	

### **Технические данные станции управления**

Номинальное напряжение сети, В	660.
Выпрямленное напряжение якорной цепи, В	50-900.
Выпрямленный ток якорной цепи, А	190.
Охлаждение тиристорного преобразователя	водяное от противопожарного става.
Напряжение питания преобразователя возбуждения, В	127.
Напряжение возбуждения, В	160.
Габариты станции, мм	2300x1000x1312.
Масса, кг	1800.



В комплект привода постоянного тока входят также: блок защиты от сетевых перенапряжений, блок-переключатель режима работы и реактор.

Оперативное управление всеми токоприемниками установки осуществляется с помощью стандартной системы управления.

### **Струговой конвейер**

Длина, м	150.
Скорость движения цепи, м/с	0,594; 1,17.
Количество приводных станций, шт	2.
Установленная мощность, кВт	160/230.
Напряжение, В	660.
Количество приводных станций, шт	2.
Приводные станции вынесены на штреки и установлены на гидрофицированных столах.	

С помощью аппаратуры осуществлялся запуск струговой установки и реверсирование струга на заданном участке.

С помощью выносного пульта управления осуществлен выбор режима работы струговой установки (работы двумя двигателями, одним верхним, одним нижним) и плавная регулировка скорости движения исполнительного органа. Система орошения - автоматическая, секционная. В состав комплекса входила механизированная крепь. Общий вид струговой установки СН2620 с приводом постоянного тока показан на рис.16.

По конвейерному штреку подавалось напряжение 660 В для питания маслостанции. По вентиляционному штреку подавалось напряжение 6 кВ для питания трансформаторных электроподстанций. Подстанция предназначалась для питания комплекта электрооборудования привода постоянного тока. Расстояние между подстанцией и станцией управления струговой установкой было в пределах 15 м. Переменное напряжение 660 В через блок сопротивлений подавалось на тиристорный преобразователь. Регулируемое напряжение постоянного типа подавалось на блок

переключения режимов работы, который обеспечивал совместную и раздельную работу электродвигателей привода исполнительного органа.

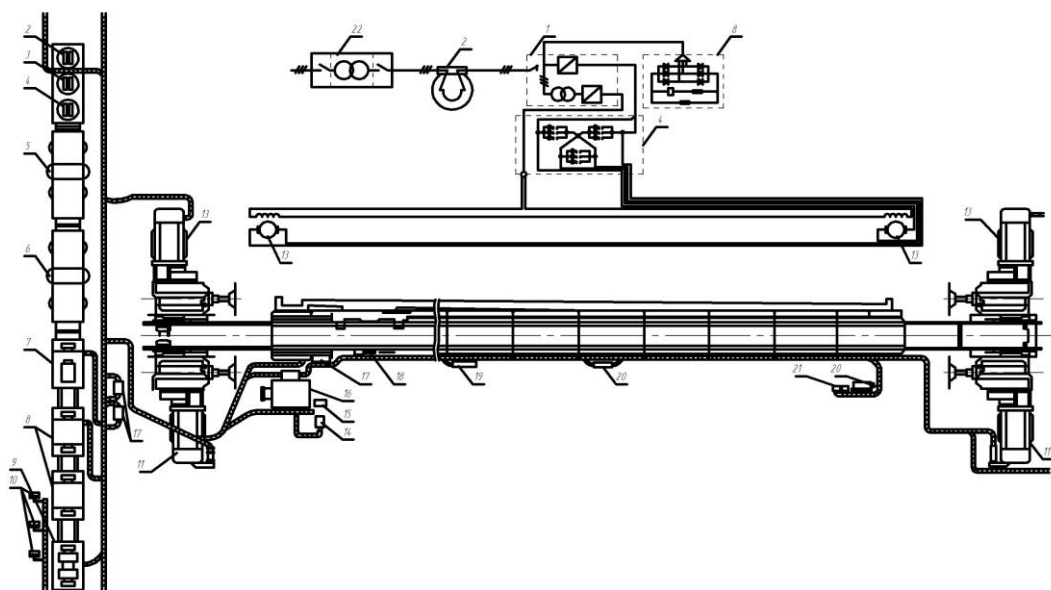


Рис.16. Струговая установка СН2620 с приводом постоянного тока

За время шахтных исследований комплексного привода постоянного тока струговой установкой СН 2620 было добыто 13523 т угля. Подвигание забоя составило 77 м, отработана площадь 11550 м<sup>2</sup>.

Работа установки проходила в сложных горно-геологических условиях: неустойчивость пород кровли, особенно в нижней части лавы, малая мощность пласта 0,6-0,65 м, что обусловило частые стопорения исполнительного органа, высокая сопротивляемость угля резанию в начале эксплуатации (до 315 кН/м).

Рост добычи в значительной мере сдерживался и рядом организационно-технических факторов. Так, количество рабочих, занятых непосредственно в лаве обслуживанием механизированной крепи, было: 3-4 человека в начальный период и 5-6 в последующий.

В лаве была смонтирована крепь, которая уже работала в одной из лав шахты. Эта крепь без выдачи на поверхность для ремонта и профилактики была перемонтирована. Минимальная мощность пласта не соответствует её паспортной характеристике. Частые отказы элементов крепи и

расклинивание секций в местах утонения пласта приводили к значительным потерям рабочего времени. В комплект установки СН2620 входил экспериментальный узел - верхний гидравлический стол с устройством для удержания установки. Управление столом требовало определенного времени для освоения обслуживающим персоналом, а выход из строя элементов стола (разрыв верхней плиты, дефекты в системе удержания) приводили к потерям рабочего времени. Значительные затраты времени требовались для выкладки бутовых полос в нижней части лавы и поддержания верхнего штрека. Все эти работы выполнялись рабочими очистного забоя и поэтому были связаны с остановкой работ по добыче. Еще одним сдерживающим рост добычи фактором является то, что вся бригада рабочих очистного забоя до этого работала в лаве с комбайновой технологией выемки. Струговая технология явилась для бригады новым делом, требующим освоения и наработки навыков.

В связи с выше указанным весь период исследований можно разделить на два этапа: наладка и освоение всего комплекса оборудования (2 недели) и установившийся режим эксплуатации. Первый период характеризуется многочисленными (до 100 в смену) стопорениями исполнительного органа, вначале на холостом ходу вследствие затирания втулок исполнительного органа на направляющих и корпусе нижнего резцедержателя, а затем в результате стопорений в кровле пласта в местах его утонения (таких участков согласно геологической съемке было не менее 9). Прохождение участков утонения пласта усложнялось также и отсутствием возможности вести визуальные наблюдения за прохождением исполнительного органа в этих местах, так как борт конвейера практически вплотную подходил к перекрытиям секций крепи.

Несмотря на неблагоприятные условия, первые дни эксплуатации показали, что новый тип привода позволяет резко сократить простой установки, связанные с заменой предохранительных элементов на выходных валах редукторов, по сравнению с асинхронным электроприводом

работающим в аналогичных условиях. Основное количество срезанных предохранительных элементов приходилось на случаи наезда исполнительного органа на приводные станции в результате неопытности операторов в начальный период освоения установки. В этих случаях срезание предохранительных элементов обусловлено жестким стопорением вращающихся масс приводных станций исполнительного органа. При стопорении исполнительного органа в забое эффективно работали системы токоограничения, за счет формирования "экскаваторной" характеристики.

По мере освоения установки количество срезов предохранительных элементов сократилось.

При эксплуатации струговой установки приходилось периодически натягивать струговую цепь. Процесс натяжения при наличии двигателей постоянного тока происходил спокойно, без рывков.

Очень важен для струговой установки характер запуска. Многочисленные наблюдения и специальные исследования на установках с асинхронным приводом свидетельствуют о резких ударных нагрузках в цепи и элементах трансмиссии, которыми сопровождается запуск приводов с электродвигателями переменного тока.

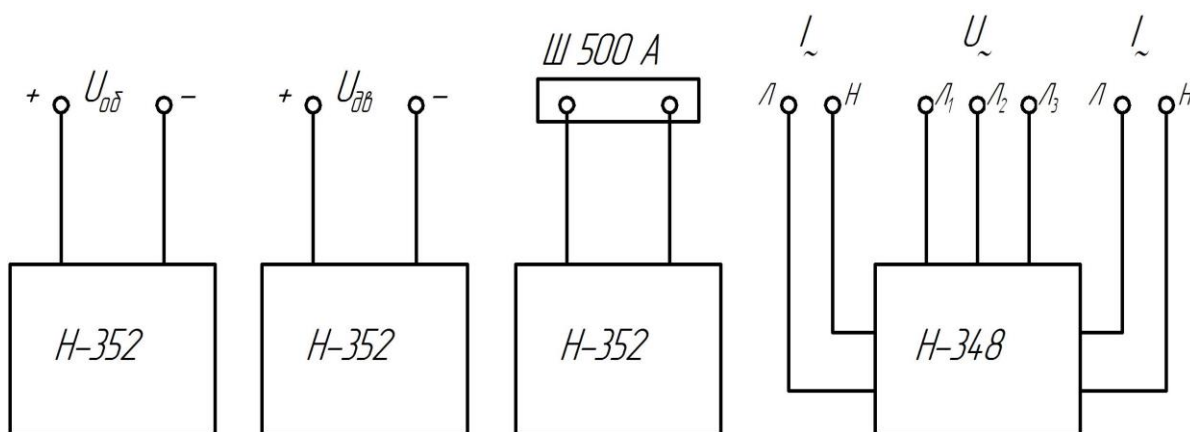
Привод с электродвигателем постоянного тока обеспечивает плавный разгон установки без ударов и рывков в трансмиссии. Интенсивность набора скорости исполнительного органа регулируется в зависимости от допустимого коэффициента динамичности. При этом резко снижается тепловой нагрев электродвигателей за счет меньшего пускового тока. Величина пускового тока в период исследований устанавливалась  $1,3-1,5 I_n$  (180-210 А), при необходимости сократить время разгона пусковой ток увеличивается до  $2-3 I_n$  (260-420 А).

В процессе исследований проводились замеры электрических параметров привода. Измерялось напряжение на якоре одного электродвигателя, общая мощность, потребляемая на стороне переменного тока. Для измерений использовались: самопишущие вольтметры,

самопишущие амперметры и киловаттметры . Учет машинного времени и активной энергии осуществлялся с помощью специального счетчика. Блок-схема подключения приборов приведена на рис.17.

Результаты обработки энергетических параметров представлены в табл.5.6. Они отражают работу установки спустя почти месяц с начала эксплуатации, когда на некоторых участках забоя появился отжим угля, способствовавший снижению энергетических затрат.

Из таблицы 5.6. видно, что максимальная потребляемая мощность 206 кВт получена при  $v_c=1,5$  м/с. Потребляемая мощность с неприжатым ставом составила 40-55 кВт. Последовательная схема включения электродвигателей обеспечила равномерное распределение нагрузки между приводами. Время выравнивания нагрузок на приводах исполнительного органа не превышало 0,57 с. Для сравнения в табл.5.7. приведены показатели потребляемой мощности асинхронными электродвигателями на установке СН2620 в аналогичных условиях. Разность нагрузок по потребляемой мощности колебалась от 4 кВт до 42 кВт, т.е. от 5% до 40%.



**Рис.17. Блок-схема включения измерительных приборов**

В условиях постоянных стопорений исполнительного органа и при большом времени выравнивания нагрузок один из электродвигателей может выйти на неустойчивую часть механической характеристики ("опрокид") в то время как второй электродвигатель будет работать на рабочей части характеристики.

Скорость движения исполнительного органа в установившемся режиме была 1,28 м/с. В процессе испытаний его скорость была повышена до 1,5 м/с за счет ослабления магнитного потока возбуждения двигателей. Конструктивно это достигалось отключением одной фазы питания выпрямителя возбуждения. Визуальные наблюдения показали, что движение исполнительного органа стало более равномерным, колебания скорости цепи были практически незаметны. Снизился размах колебаний напряжения на двигателе, а значит и скорости привода.

Эксперименты с ослаблением потока возбуждения показывают, что можно осуществить такую механическую характеристику, когда будет обеспечиваться полное использование установленной мощности. В этом случае «экскаваторная» характеристика привода с заданными токами отсечки и стопорения дополняется участком, на котором привод работает с ослаблением потока возбуждения, что возможно на участках с мягким углем, где скорость исполнительного органа может быть увеличена.

Таблица 5.6.

**Результаты обработки энергетических параметров при работе струговой установки с электродвигателями постоянного тока в шахтных условиях.**

№ п/п	Направление движения струга	Напряжение приборов, Вт	Ток якорной цепи, А	Мощность, кВт	Скорость струга, м/с
1	Вверх	876	155	136	1,28
2	Вниз	762	227	169	
3	Вверх	826	187	155	
4	Вниз	825	207	166	
5	Вверх	816	211	167	
6	Вверх	840	183	154	
7	Вниз	820	203	166	
8	Вверх	833	197	164	
9	Вниз	840	195	165	
10	Вверх	816	208	170	
11	Вниз	840	167	140	
12	Вверх	850	190	111	
13	Вниз	855	121	103	

Продолжение табл.5.6.					
14	Вниз	912	112	102	1,5
15	Вверх	912	109	99	
16	Вниз	876	160	140	
17	Вверх	876	157	133	
18	Вниз	876	125	110	
19	Вниз	876	235	206	
20	Вверх	876	195	131	
21	Вверх	880	147	131	
22	Вниз	888	160	142	
23	Вниз	876	230	201	
24	Вверх	876	225	197	
25	Вверх	876	163	141	
	Среднее	846	172	145	$V_c = 1,28$
	Среднее	879	185	163	$V_c = 1,5$

Таблица 5.7.

**Результаты обработки энергетических параметров при работе  
струговой установки с асинхронными электродвигателями в шахтных  
условиях**

Проходы струга по лаве	Потребляемая мощность, кВт		
	верхний	нижний	суммарное
1	60	71	131
2	57	73	130
3	64	69	133
4	64	79	143
5	61	76	137
6	61	92	173
7	57	63	120
8	60	102	162
9	77	88	165
10	60	92	162
11	72	77	149
12	48	72	120
13	65	64	129
14	70	67	137

Продолжение табл.5.7			
15	71	84	155
16	70	88	156
17	72	59	131
18	69	51	120
19	55	69	124
20	67	65	132
21	70	53	123
22	61	76	137
23	71	63	134
24	76	80	156
25	66	78	144
26	56	89	145
Среднее	66	76	142

Величина напряжения на выходе тиристорного преобразователя изменялась в пределах 840-880 В. Это свидетельствует о необходимости стабилизации выходного напряжения преобразователя. Максимальный размах колебаний напряжения на одном двигателе зарегистрирован в опыте с передаточным числом редуктора  $i=35,5$  и достигал 550 В, а минимальный - 120 В. При скорости движения исполнительного органа 1,28 м/с максимальный размах колебаний достигал 400 В, минимальный - 150 В. В условиях с предварительным натяжением цепи размах колебаний резко уменьшился и находился в пределах 80-100 В. Такой же эффект наблюдался при переводе установки на скорость движения исполнительного органа 1,5 м/с.

В процессе исследований проводились замеры толщины стружки в четырех точках, равномерно распределенных по длине лавы.

В табл.5.8. при заданных скорости струга  $V_c$  и давлении в системе подачи  $P$  приведены значения величины стружки  $h$ . В этой же таблице приведены значения энергоемкости процесса добычи.



Удельные энергозатраты при работе струговой установки с асинхронными электродвигателями составляют 0,48- 0,52 кВт.ч.

Была также проанализирована работа экспериментального оборудования.

### **Преобразователь.**

После первоначальной наладки тиристорный преобразователь работал устойчиво, обеспечивая необходимую перегрузочную способность привода (2-2,5 Нм), ограничение при стопорении (1,5-2 Нм в начале отсечки и 2,5-3 Нм при стопорении) и автоматический разгон установки в функции времени (2-2,5с.) сограничением тока на уровне  $1,5 I_n$ .

Во время интенсивной работы выход из строя тиристоров не наблюдался.

Таблица 5.8.

### **Энергоёмкость процесса добычи**

$V_{стр}$ , м/с	P, Мпа	h, м	$h_{cp}$ , м	Э, кВт.ч/т
1,28	5	0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,06; 0,06; 0,07; 0,07; 0,06; 0,07; 0,06; 0,06	0,064	0,364
1,5	5	0,06; 0,05; 0,0075; 0,055; 0,065; 0,07; 0,045; 0,055; 0,04; 0,04; 0,06; 0,07; 0,05; 0,045; 0,06; 0,06	0,0562	0,487

### **Система управления**

Установлено, что отказы в системе управления не наблюдалось.

### **Электродвигатели постоянного тока.**

В процессе исследований было установлено, что электродвигатели обеспечивали устойчивую работу струговой установки в различных режимах нагружения.

Электродвигатели привода исполнительного органа, включенные последовательно, позволили получить высокое тяговое усилие, до 600 кН, в момент прохождения утонений пласта, когда система токоограничения была отстроена по максимуму. Обеспечивался и "ползучий" режим работы для ремонта и осмотра установки. Вместе с тем, резко снизился нагрев электродвигателей по сравнению с асинхронными машинами, работающими в аналогичных условиях: с частыми пусками, стопорениями и реверсами. После часа работы корпуса асинхронных электродвигателей, как правило, нагреваются до температуры свыше 100°С. Температура корпусов электродвигателей постоянного тока не превышала 50-60°С. При этом расход воды в системе охлаждения не превышал 1л/мин. Основной фактор резкого снижения тепловых потерь - это уменьшение пускового тока.

#### **Система автоматического регулирования.**

Главным требованием к системе автоматического регулирования (САР) ставилось ограничение момента электропривода в режиме работы "на упор". С учетом этого основной обратной связью в САР была принята гибкая, отрицательная обратная связь по току с задержкой.

САР обеспечивала плавный, с регулируемой длительностью, запуск электродвигателей. В режиме «дотягивания» исполнительного органа на концевых участках лавы уменьшение скорости приводов обеспечивалось снижением напряжения преобразователя путем изменения задающего сигнала. Схема предусматривала возможность ручного режима работы, когда оператор непосредственно осуществлял «дотяжку» исполнительного органа и автоматический режим, при котором подачей импульса от концевого выключателя вводилось сопротивление в цепь задающего сигнала.

В процессе исследований было установлено, что САР обеспечивает: плавный разгон, за 1,5-2 с, привода исполнительного органа, полностью исключает резкие ударные нагрузки в трансмиссии;

ограничение пускового тока в пределах 1,2-1,5  $I_n$ ;

перегрузочную способность приводов 2,5-3  $I_n$  и надежное ограничение момента электродвигателей.

Исследования позволили выявить ряд недостатков принятой САР, а именно:

невозможность стабилизации скорости приводов на заданном уровне в автоматическом режиме работы;

при стопорении исполнительного органа с последующим срывом, в связи с подачей полного напряжения на электродвигатели, наблюдался резкий колебательный процесс и полная остановка исполнительного органа с момента срыва до выхода привода на номинальную скорость.

Анализ работы САР, показал, что система автоматического регулирования обеспечила плавный, регулируемый по времени, запуск установки и формирование "экскаваторной" механической характеристики. В процессе эксплуатации выявлено, что при изменении длительности запуска менялась и величина установки тока отсечки. Объясняется это тем, что сигналы задающей и обратной связи по току заведены в общий сумматор, и регулировка сопротивления в цепи сигнала управления оказывает влияние на величину сопротивления в цепи сигнала отсечки. В связи с отсутствием стабилизации скорости привода в режиме дотягивания исполнительного органа оператор вынужден был периодически менять положение регулятора скорости. При возрастании нагрузки выше предельной САР надежно осуществляла ограничение электромагнитного момента, т.е. обеспечивала формирование "экскаваторной" характеристики.

Однако в режиме сброса нагрузки, когда система переходит с режима стопорения к режиму с минимальной нагрузкой, обратная связь по току отключается и преобразователь задающим сигналом выводится на полное напряжение. В этом случае происходит разгон привода с постоянным моментом, равным моменту при токе отсечки. Визуальные наблюдения показали, что в этих условиях переходный процесс носит резко выраженный колебательный характер с 2-3 полными остановками исполнительного

органа. Ограничение электромагнитного момента в режиме тока, отсечки позволило сократить число срезв предохранительных элементов по сравнению с асинхронным приводом. Наблюдения во время работы установки показали, что такое ограничение эффективно при длине цепи между исполнительным органом и головной приводной станцией большей критической ( $l \approx 20\text{м}$ ), но малосущественно при меньших длинах. Однако уменьшение тока отсечки, как правило, исключало срез предохранительного элемента при стопорениях в пределах критической длины.

Учитывая результаты исследований в шахтных условиях, ШахтНИУИ предложил реализовать САР с подчиненным регулированием параметров. В отличие от исследованной схемы, здесь задающее напряжение  $U_3$  подается скачком. Задающий сигнал положительной обратной связи по току якорей  $U_0$  и отрицательной по напряжению суммируются на входе регулятора напряжения. Напряжение управления  $U_y$  суммируется с сигналом отрицательной обратной связи  $U_{от}$  по току электродвигателей на входе звена ограничения, имеющего характеристику "вход-выход" с ограничением выходной величины. В качестве регулятора тока используется интегральный регулятор. В режимах, близких к стопорению, работа схемы практически не отличается от исследованной на шахте. Однако в момент начала движения исполнительного органа ток уменьшается,  $U_y$  и  $U_{от}$  возрастают до максимального значения. На вход регулятора тока будет подаваться постоянный сигнал, который обеспечит нарастание Э.Д.С. преобразователя практически по линейному закону и тем самым обеспечит плавный разгон электродвигателей привода исполнительного органа после преодоления максимального момента сопротивления. Для устранения влияния инерционности регулятора в режиме стопорения на вход преобразователя вводится задержанная отрицательная обратная связь  $I_{ом}$  по току электродвигателей. Стабилизация скорости приводов осуществляется положительной обратной связью по току. Параллельная коррекция позволит

получить любую требуемую жесткость рабочего участка механической характеристики. Такая структура САР позволит осуществить:

плавный запуск приводов исполнительного органа;

ограничение момента приводов в режиме стопорения заданным значением;

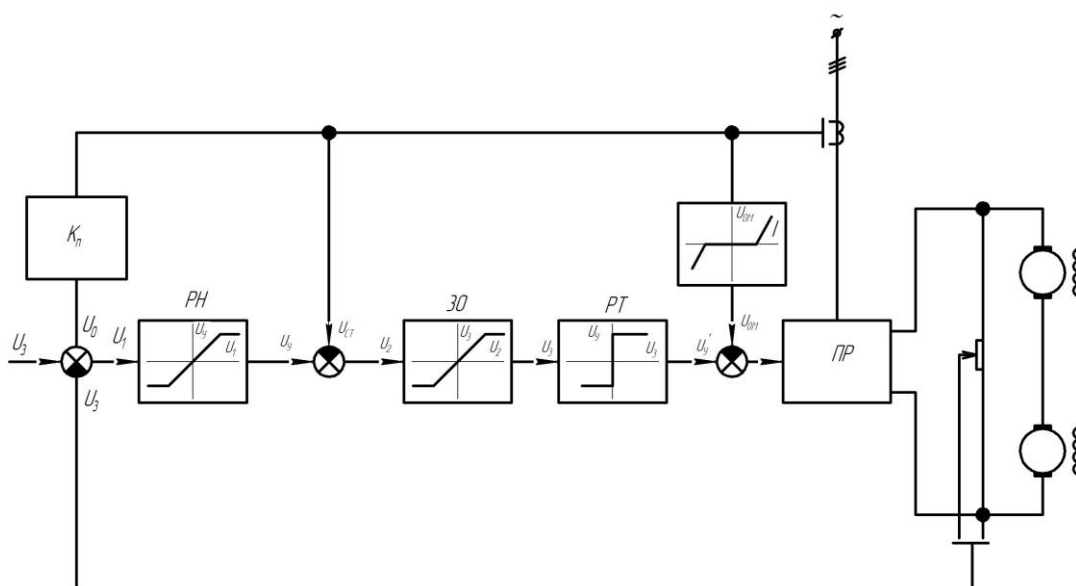
плавный переходный процесс при внезапном сбросе нагрузки;

ограничение пускового тока;

стабилизацию скорости приводов исполнительного органа на заданном уровне и отвечает всем техническим требованиям, предъявляемым к регулируемому приводу.

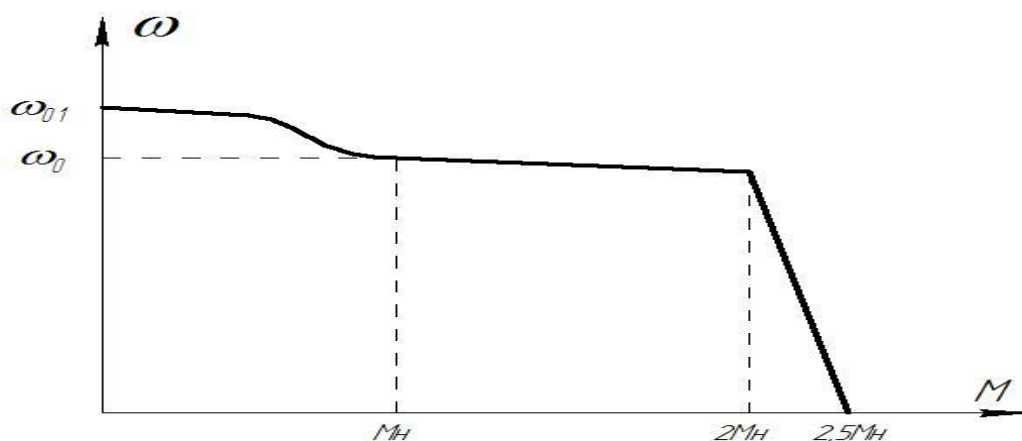
Шахтные исследования подтвердили целесообразность формирования для привода "экскаваторной" механической характеристики с регулируемой величиной момента отсечки. При этом величина момента отсечки должна быть меньше момента стопорения.

Анализ результатов замеров тока и мощности показывает, что потребляемая мощность приводов исполнительного органа колеблется как в течении одного прохода лавы, так и от прохода к проходу. С целью оптимального использования привода по мощности, а, следовательно, и обеспечение максимальной производительности, необходимо увеличивать скорость исполнительного органа при нагрузках меньших номинальной. При нагрузках больших номинальной скорость привода не должна существенно изменяться с тем, чтобы поддержать заданную производительность. Этому условию отвечает механическая характеристика электродвигателя независимого возбуждения с регулировкой магнитного потока в сторону уменьшения при нагрузках меньших номинальной. Усовершенствованная структура схемы САР представлена на рис.18.



**Рис.18. Усовершенствования структурная схема САР**

Механическая характеристика электродвигателя для этого случая имеет вид представленный на рис.19. С целью обеспечения максимальной производительности и ограничения перегрузок в трансмиссии механическая характеристика электропривода должна обеспечить: высокую жесткость при изменении момента от номинального до момента отсечки; повышение скорости при моментах нагрузки меньше номинального, с условием сохранения хорошей коммутации; регулируемую величину момента отсечки.



**Рис.19. Механическая характеристика электропривода**

Приведенные шахтные исследования привода постоянного тока позволили сделать следующие выводы:

1. Разработанная в ШахтНИУИ схема привода обеспечивает равномерную загрузку электродвигателей во всех режимах нагружения, что повышает перегрузочную способность привода в целом и позволяет, в отличие от нерегулируемого привода, максимально использовать установленную мощность.

2. Такой тип привода исключает необходимость предохранительной муфты, позволяет значительно снизить количество срезв предохранительных элементов, что существенно снижает простои лавы.

3. Привод обеспечивает плавный одновременный разгон приводных станций, исключает резкие ударные нагрузки в трансмиссии при пуске, характерные для асинхронного привода исполнительного органа.

4. Регулируемый привод позволяет при одинаковых номинальных скоростях исполнительного органа с асинхронным приводом, повысить производительность установки за счет повышения скорости при нагрузках меньше номинальной.

5. Тепловые потери на пусках у привода постоянного тока в 16,3 раза меньше, чем у асинхронного короткозамкнутого электропривода с гидромуфтой и в 10,3 раза меньше при отсутствии гидромуфты. Снижение пускового тока не только резко уменьшает тепловые потери, но и позволяет увеличить шаг переноски распределителя струговой установки.

6. Привод позволяет осуществить снижение скорости на концевых участках лавы, что обеспечивает надежную работу установки в автоматическом режиме.

7. Привод позволяет осуществить плавное предварительное натяжение цепи исполнительного органа с определенным усилием.

8. Тиристорный преобразователь обеспечивает необходимую перегрузочную способность привода. Контактные аппараты в преобразователе работают в облегченном режиме по сравнению с аппаратами управления асинхронными электродвигателями.

## 6. Расчет мощности привода исполнительного органа

Расчет мощности электродвигателей привода исполнительного органа следует начинать с определения её предварительного значения:

$$P_{\text{сум.п}} = \frac{F_э \cdot V_c}{1000n_M}, \text{ кВт}, \quad (6.1)$$

где  $n_M$  - к.п.д. механической передачи привода, принимается по конструкторской документации на установку, при проектировочных расчетах рекомендуется принимать  $n_M = 0,82$ ;

$F_э$  - эффективное значение тягового усилия:

$$F_э = F_T \sqrt{1 + v^2} \text{ Н}, \quad (6.2)$$

где  $v$  - результирующий коэффициент вариации тягового усилия в цепи струга.

При расчетах  $F_э$  значение  $v$  рекомендуется принимать: для отрывных струговых установок  $v = 0,305$ , для скользящих струговых установок  $v = 0,275$ .

Следует отметить, что электродвигатели приводов исполнительного органа работают в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками.

При отстающем режиме работы струговой установки ( $V/V_K < 1$ ) фактическая относительная продолжительность включения электродвигателей привода струга для электродвигателей с независимым водяным охлаждением –  $ПВ_{\text{факт}} = 40\%$ . При опережающем режиме работы ( $1 < V/V_K < 3,5$ )  $ПВ_{\text{факт}} = 30\%$ .

Предварительно установленное значение необходимой номинальной мощности электродвигателя привода в продолжительном режиме работы определяется по формуле:

$$P'_H = \frac{P_{\text{сумп}}}{2 \cdot \sqrt{\frac{ПВ'_{\text{ном}}}{ПВ_{\text{факт}}} + \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}} \left( \frac{ПВ'_{\text{ном}}}{ПВ_{\text{факт}}} - 1 \right)}}, \text{ кВт}. \quad (6.3)$$



По значению  $P'_H$  предварительно выбирается электродвигатель привода исполнительного органа, мощность которого должна быть выше или равна значению  $P'_H$ . По технической характеристике этого электродвигателя определяется его паспортные данные:

$P_H$  – номинальная мощность кВт;

$M_H$ ,  $M_H$  и  $M_K$  - соответственно номинальный, пусковой и критический момент, Н·м;

$S_H$  и  $S_K$  - номинальное и критическое скольжение;

$J$  – момент инерции ротора,

$R_1$  и  $R_2$  – сопротивления обмоток статора и ротора, Ом;

$\Delta P_{\text{мех}}$ ,  $\Delta P_{\text{пер}}$ ,  $\Delta P_{\text{пост}}$ , - механические, переменные и постоянные потери, кВт;

$n_0$  – синхронное число оборотов, об/мин;

$PВ_{\text{ном}}$  - номинальная продолжительность включения, %;

$\eta$  - к.п.д. электродвигателя.

Расчет эффективного значения момента электродвигателей головного  $M_{\text{э1}}$  и концевого  $M_{\text{э2}}$  приводов производится в следующей последовательности.

$$M_{\text{э1}} = M_{01} \sqrt{1 + v_1^2}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.4)$$

$$M_{\text{э2}} = M_{02} \sqrt{1 + v_2^2}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (6.5)$$

где:  $M_{01}$  и  $M_{02}$  – средние значения моментов электродвигателей головного и концевого приводов исполнительного органа, Н·м;

$v_1$  и  $v_2$  – результирующие коэффициенты вариации моментов электродвигателей головного и концевого приводов.

Средние значения моментов электродвигателей определяются по формуле:

$$M_{01} = M_{02} = \frac{R \cdot F_T}{2 \cdot i}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (6.6)$$

где  $R$  - радиус начальной окружности тяговой звездочки привода струга, м;

$F_T$  - среднее значение тягового усилия в цепи исполнительного органа, Н;

$i$  – передаточное число редуктора привода .

Результирующий коэффициент вариации мощности электродвигателя приводов равен:

$$v_1 = \sqrt{v_{н1}^2 + v_{в1}^2}, \quad (6.7)$$

где  $v_{н1}, v_{в1}$  - коэффициенты вариации низкочастотной и высокочастотной составляющей момента электродвигателя головного привода исполнительного органа.

Результирующий коэффициент вариации момента электродвигателя концевго привода равен

$$v_2 = v_{н2}. \quad (6.8)$$

Здесь  $v_{н2}$  - коэффициент вариации низкочастотной составляющей момента электродвигателя концевго привода.

Значения  $v_{н1}$  и  $v_{в1}$  определяются по выражениям:

$$v_{н1} = 1,4v_n; \quad (6.9)$$

$$v_{в1} = 0,6v_n, \quad (6.10)$$

где  $v_n$  – коэффициент вариации низкочастотной составляющей тягового усилия в цепи струга.

Величина  $v_n$  определяется по формуле

$$v_n = k_n \cdot v_\ell,$$

где  $k_n$  - коэффициент влияния неравномерности сил резания на неравномерность тягового усилия в цепи исполнительного органа. Значение  $k_n$  принимаются в соответствии с таблицей 6.1.

Таблица 6.1.

## Зависимость коэффициента $k_H$ от величины результирующей средних сил резания

Результирующая средних сил резания, кН	Значение коэффициента $k_H$	
	отрывной струг	скользящий струг
10-20	0,2-0,35	0,32-0,47
20-30	0,35-0,45	0,47-0,57
30-40	0,45-0,52	0,57-0,64
40-50	0,52-0,57	0,64-0,69
50-60	0,57-0,61	0,69-0,73
60-70	0,61-0,63	0,73-0,76
80-100	0,64-0,66	0,76-0,79
100-120	0,65-0,68	0,79-0,82
120-150	0,68-0,70	0,82-0,84

Коэффициент вариации высокочастотной составляющей момента электродвигателя головного привода струга  $v_{в1}$  равен

$$v_{в1} = 2v_{в},$$

где  $v_{в}$  – коэффициент вариации высокочастотной составляющей тягового усилия в цепи.

Значения  $v_{в}$  следует принимать: для отрывной струговой установки - от 0,29 до 0,32; для скользящей струговой установки – от 0,20 до 0,25 (меньше значения для более слабых углей).

Результирующее эффективное значение момента электродвигателя привода равно:

$$M_{э} = \sqrt{\frac{M_{э1}^2 + M_{э2}^2}{2}}. \quad (6.12)$$

Необходимая суммарная мощность электродвигателя привода исполнительного органа определяется:

$$P_{сум} = \frac{2M_{э}n_H}{9550\eta_H}, \text{ кВт}, \quad (6.13)$$

где  $n_H$  - номинальная частота вращения ротора электродвигателя

$$n_H = n_0 (1 - S_H). \text{ об/мин.} \quad (6.14)$$

Если  $P_{\text{сум}} \leq P_{\text{н}}^1$ , значит выбранный предварительно электродвигатель по механическим характеристикам соответствует условиям работы. При  $P_{\text{сум}} > P_{\text{н}}^1$  необходимо принять следующий по мощности электродвигатель.

Возможная тепловая мощность выбранного электродвигателя в повторно-кратковременном режиме работы определяется по выражению

$$P_{\text{п.н.}} = P_{\text{н}} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{ном}}}{ПВ_{\text{факт}}} + \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}} \left( \frac{ПВ_{\text{ном}}}{ПВ_{\text{факт}}} - 1 \right)}, \text{ кВт} \quad (6.15)$$

Значения  $\Delta P_{\text{пост}}$  и  $\Delta P_{\text{пер}}$  принимаются по технической характеристике электродвигателя.

Если  $P_{\text{сум}} \leq 2P_{\text{п.н.}}$ , то выбранный электродвигатель пригоден для использования в составе привода исполнительного органа в заданном повторно-кратковременном режиме.

Мощность допустимых суммарных потерь в электродвигателе при работе в продолжительном режиме равна

$$\Delta P_1 = P_{\text{н}} \left[ \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) + \frac{\kappa'_d - 0,5}{\eta} - \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{P_{\text{н}}} \right], \text{ кВт}, \quad (6.16)$$

где:  $\eta$  - к.п.д. электродвигателя, % принимается по технической характеристике на электродвигатель.

$\kappa'_d$  - числовой коэффициент, величина которого определяется синхронной частотой вращения ротора электродвигателя; при  $n_0 = 1500$  об/мин  $\kappa'_d$  принимается равным 1,66.

Выше отмечалось, что работа приводов характеризуется частыми пусками. Потери электродвигателя при пуске определяются по формуле:

$$\Delta A_{\text{н}} = \frac{J_1 \omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right), \text{ Вт} \quad (6.17)$$

где  $J_1$  - момент инерции ротора электродвигателя и приведенный к нему момент инерции вращающихся элементов редуктора,

$\omega_0 = \frac{0\pi}{30}$  рад/с – синхронная угловая скорость вращения ротора

электродвигателя;

$R_1$  и  $R_2$  – сопротивление обмоток статора и ротора электродвигателя, Ом.

Мощность фактических суммарных потерь в электродвигателе в повторно-кратковременном с частыми пусками режиме работы определяется по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}} \cdot k_3^2 + \frac{\Delta A_n}{t_p}, \text{ кВт.} \quad (6.18)$$

Коэффициент загрузки электродвигателей привода исполнительного органа:

- головного  $k_{31} = \frac{P_{\text{сум}}}{P_n} \cdot k'_{31}; \quad (6.19)$

- концевой  $k_{32} = \frac{P_{\text{сум}}}{P_n} \cdot k'_{32}, \quad (6.20)$

Значения  $k_{31}$  и  $k_{32}$  определяется в соответствии с табл.6.2.

Продолжительность периода установившейся работы электродвигателей привода исполнительного органа  $t_p$  зависит от фактического числа включений в час  $Z_{\text{факт.i}}$  и передаточного отношения редуктора  $i$ :

-при  $V_c < V_k$   $t_p = \frac{1440}{Z_{\text{факт.i}}};$

-при  $V_c > V_k$   $t_p = \frac{1080}{Z_{\text{факт.i}}};$

Рекомендуется провести расчеты  $t_p$  при  $Z_{\text{факт.i}}=10; 35; 75; 120$  и  $175$  вкл/час.

Рациональные значения выдержки времени между пусками электродвигателей привода исполнительного органа, обеспечивающие минимум механических и тепловых потерь определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{10^3 P_H}{\omega_H^2 \cdot c_2}, \text{ сек} \quad (6.21)$$

Здесь  $c_2$  –приведенный к ротору электродвигателя коэффициент жесткости вспомогательной ветви цепи исполнительного органа:

$$c_2 = \frac{c_0 R^2}{L_c \cdot U_p^2} \quad (6.22)$$

Значение жесткости цепи исполнительного органа  $c_0$  принимается по технической документации.

Таблица 6.2.

**Значения коэффициентов  $K'_{31}$  и  $K'_{32}$  при  $\Delta t = 0,3$**

$Z_{\text{факт.и}}, \text{ ВКЛ/Ч}$			10	35	75	125	175
$V_c=0,6-0,8 \text{ м/с}$	$C_0=(4-5) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	1,06	1,07	1,08	1,10
		$K'_{32}$	1,00	0,93	0,87	0,85	0,83
	$C_0=(6-7) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,99	0,98	0,85	0,73
		$K'_{32}$	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93
	$C_0=(8-9) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	1,00	0,90	0,90	0,85
		$K'_{32}$	1,00	1,00	1,10	1,10	1,15
$V_c=1,0-1,2 \text{ м/с}$	$C_0=(4-5) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	1,02	1,03	1,03	1,02
		$K'_{32}$	1,00	0,98	0,97	0,97	0,95
	$C_0=(6-7) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,93	0,80	0,70	0,65
		$K'_{32}$	1,00	1,07	1,20	1,30	1,35
	$C_0=(8-9) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,90	0,80	0,65	0,52
		$K'_{32}$	1,00	1,10	1,20	1,35	1,48
$V_c=1,5-3,0 \text{ м/с}$	$C_0=(4-5) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,88	0,73	0,60	0,50
		$K'_{32}$	1,00	1,03	1,12	1,26	1,37
	$C_0=(6-7) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,90	0,78	0,70	0,60
		$K'_{32}$	1,00	1,03	1,12	1,30	1,40
	$C_0=(8-9) \cdot 10^7 \text{ Н}$	$K'_{31}$	1,00	0,90	0,83	0,73	0,62
		$K'_{32}$	1,00	1,02	1,08	1,22	1,38

Мощность допустимых суммарных потерь в электродвигателе в повторно-кратковременном режиме работы при различных значениях

$Z_{\text{факт.и}}$  определяется по формуле:

$$P_2 = \Delta P_1 \frac{100}{ПВ_{\text{факт}}} - \frac{\Delta A_n}{t_p}, \text{кВт.} \quad (6.23)$$

Далее следует определить устойчивое значение момента электродвигателя головного привода:

$$M_{\text{уст1}} = \frac{0,7M_k}{m_2(1 + k_d V_{н.1})}, \text{Н} \cdot \text{м}, \quad (6.24)$$

где:  $M_k$  - значение критического момента электродвигателя привода исполнительного органа;

$m_2$  - кратность допустимой перегрузки электродвигателя головного привода по фактору высокочастотной составляющей момента сопротивления на тяговой звездочке;

$k_d$  - относительное отклонение низкочастотной составляющей момента электродвигателя головного привода, по результатам исследования ШахтНИУИ  $k_d = 1,9$ ;

$V_{н.1}$  - коэффициент вариации низкочастотной составляющей момента электродвигателя головного привода.

Для определения значения  $m_2$  необходимо воспользоваться графиком на рис.20, предварительно определив величины  $m_2$  кратности наибольших значений высокочастотной составляющей момента сопротивления на тяговой звездочке головного привода исполнительного органа.

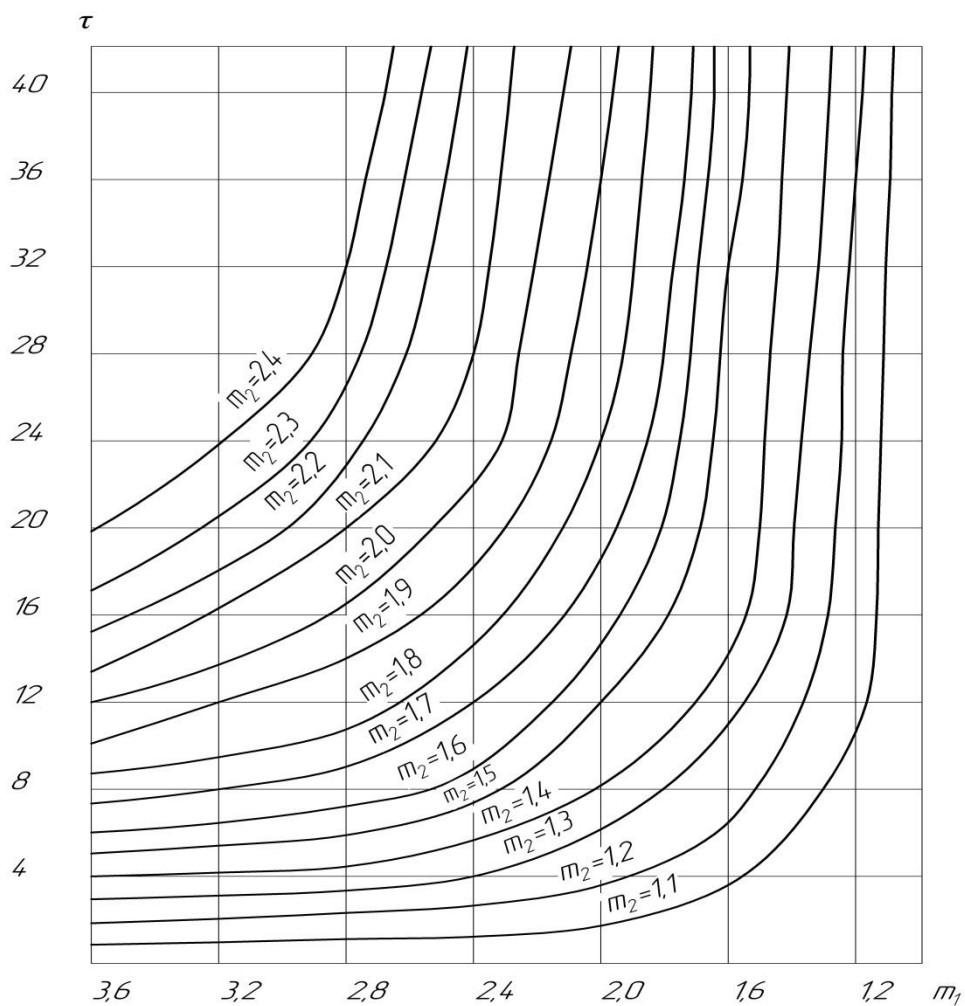
Величина  $m_1$  определяется по формуле:

$$m_1 = \frac{M_1}{M_{01}}, \quad (6.25)$$

где  $M_1$  – наибольшее значение высокочастотной составляющей момента сопротивления на тяговой звездочке головного привода, рассчитываемое по формуле:

$$M_1 = M_{01} + \frac{R}{U_p} A_{f \max}, \quad (6.26)$$

где  $A_{f \max}$  - наибольшее значение амплитуды высокочастотной составляющей тягового усилия в цепи исполнительного органа.



**Рис.20. График для определения значений  $m_2$**

Наибольшее значение амплитуды высокочастотной составляющей тягового усилия в цепи исполнительного органа определяется по формуле:

$$A_{f \max} = A'_{f \max} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (6.27)$$

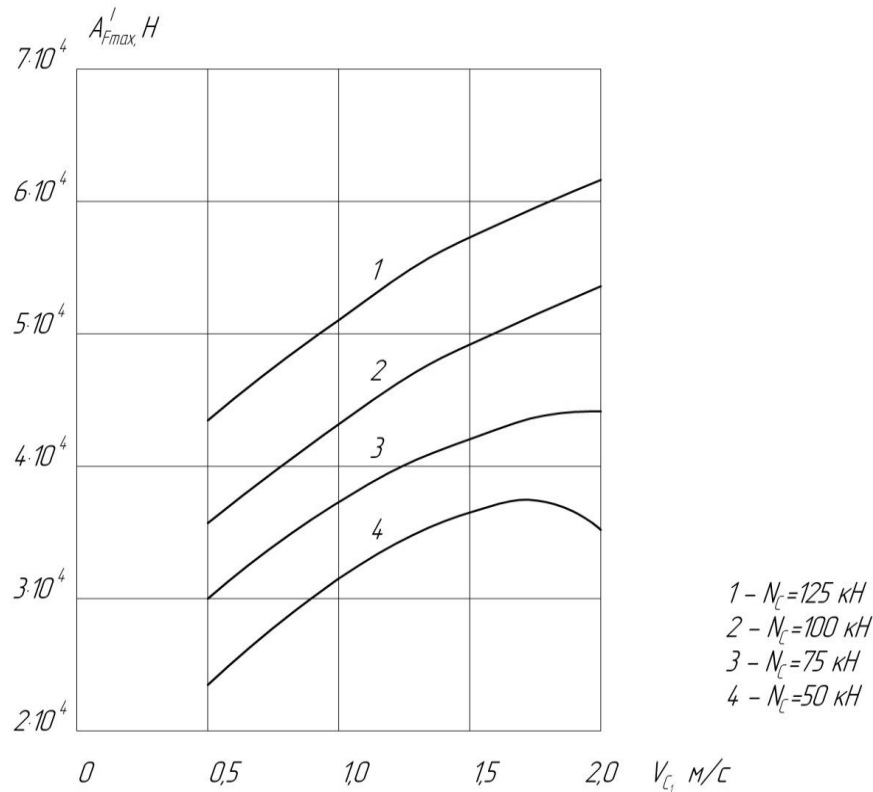
где  $A'_{f \max}$  - наибольшее значение амплитуды высокочастотной составляющей для принятых значений массы исполнительного органа  $m_c = 2500$  кг и жесткости цепи исполнительного органа  $c_0 = 4,3 \cdot 10^6$  Н. Величина  $A'_{f \max}$  определяется по графику на рис. 21.

$k_1$  - коэффициент влияния массы исполнительного органа;  $k_1 = 0,9-0,95$  – при массе исполнительного органа  $m_c = 1000-2000$  кг;  $k_1 = 1,0-1,25$  – при массе исполнительного органа  $m_c = 3000-4500$  кг;



$k_2$  - коэффициент влияния жесткости цепи исполнительного органа;  $k_2=1,0$  при  $c_0 = (4,3-5,1) \cdot 10^7$  Н,  $k_2=1,05-1,1$  при  $c_0 = (6,5-8,7) \cdot 10^7$  Н ;

$k_3$  -коэффициент влияния наибольших значений результирующей сил резания на резцах исполнительного органа в момент скола элемента стружки,  $k_3=1,2$ .



**Рис.21. График для определения  $A'_{Fmax}$  при различных значениях усилий подачи  $N_c$**

Если  $\frac{M_{уст1}}{K_{31}} \leq M_n$ , то принятый электродвигатель пригоден для его использования в составе привода исполнительного органа по фактору возможности работы без опрокидывания при заданных нагрузках на него.

## Заключение

В результате проведенных исследований была установлена работоспособность частотно-регулируемого привода струговых установок.

Возможность работы электродвигателей на повышенной частоте с увеличением их мощности.

Предложенная система автоматического регулирования обеспечивает получение экскаваторных характеристик привода во всем диапазоне частот.

При частотно-регулируемом приводе загрузка электродвигателей не равномерна как и при нерегулируемом приводе. При этом отличие в загрузке двигателей колеблется в пределах 10% - 25%.

Разработанная схема привода на базе электродвигателей постоянного тока обеспечивает равномерную загрузку электродвигателей во всех режимах нагружения, что повышает перегрузочную способность привода в целом и позволяет максимально использовать установленную мощность. Такой тип привода исключает необходимость предохранительной муфты.

Привод постоянного тока обеспечивает плавный одновременный разгон приводных станций, исключает резкие ударные нагрузки в трансмиссии при пуске, характерные для асинхронного привода исполнительного органа.

Тепловые потери на пусках у привода постоянного тока в 16,3 раза меньше, чем у асинхронного короткозамкнутого электропривода с гидромуфтой и в 10,3 раза меньше при отсутствии гидромуфты.

Привод постоянного тока позволяет осуществить плавное снижение скорости на концевых участках лавы, что обеспечивает надежную работу установки в автоматическом режиме.

Привод позволяет осуществить плавное предварительное натяжение цепи исполнительного органа с определенным усилием.

Тиристорный преобразователь обеспечивает необходимую перегрузочную способность привода. Контактные аппараты в преобразователе работают в облегченном режиме по сравнению с аппаратами управления асинхронными электродвигателями.

Проведенные исследования показали, что предложенные схемы привода обеспечивают эффективность регулирования привода струговых установок.