

## АНАЛИЗ РЕГУЛИРУЕМЫХ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПРЕДМЕТ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НИЖНЕГО УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОИНФОРМАТИВНЫМ МНОГОСВЯЗНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Жукова Н.В., аспирант, e-mail: natali@fcita.dn.ua  
Донецкий государственный технический университет

*Выполнен анализ упругого взаимодействия регулируемых координат электропривода «скорость», «момент», «мощность». Сформирован нижний уровень управления САУ малоинформативным электромеханическим объектом, состоящий из электроприводов, регулируемых однородным образом только по мощности.*

*The analysis of elastic interaction of regulated coordinates of the electric drive "«velocity", "«moment", "«power" is carried out. The lower level of control SAC of electromechanical plant with information limitations consisting of electric drives, regulated by a homogeneous image only on power is generated.*

Современные САУ технологическими процессами обработки металла давлением (ОМД) реализуются только при условии адекватного измерения основных кинематических и силовых параметров технологического процесса. Однако существуют непрерывные технологии ОМД [1], которые в силу многих причин, обусловленных как технологическими, так и экономическими проблемами, не оснащены необходимыми средствами измерения. Поэтому, проблема автоматизации объектов с информационными ограничениями очень актуальна.

Управление многосвязной электромеханической системой в непрерывных технологиях ОМД [2, 3] осуществляется посредством двух уровней управления – нижнего и верхнего. На нижнем уровне обеспечивается управление локальными электроприводами по нескольким известным координатам: скорость  $\omega$ , момент  $M_{э.м}$ . Верхний уровень управления предназначен для коррекции задающих и, соответственно, управляющих воздействий при регулировании упо-

мянутых координат электропривода с целью приведения системы к динамическому равновесию (стационарному состоянию).

Перечислим основные технологические параметры, непосредственное измерение которых является проблематичным для объектов с информационными ограничениями:

а). собственные моменты нагрузок, которые зависят от многих параметров, в том числе, и от состояния рабочего тела в межклетевых промежутках (МКП);

б). натяжения или сжатия рабочего тела в МКП;

в). реологические свойства рабочего тела, которые могут принимать свойство гистерезисной упруго-вязко-пластической среды;

г). катающие диаметры, задаваемые технологом с некоторой погрешностью, увеличивающейся в процессе износа инструмента;

д). вытяжки, соответствующие технологическим операциям также задаются с погрешностью и дополнительно зависят от начальной настройки стана.

Упомянутые параметры влияют на ошибку задания скоростей  $\omega_i$  или электромагнитных моментов  $M_{эмi}$  на каждой клетки, что отражается на состоянии рабочего тела в МКП: малые изменения в длинах рабочего тела порождают большие усилия натяжения или сжатия. Это приводит к проскальзыванию валков относительно рабочего тела, что вызывает повторяющиеся переходные процессы, переходящие от одной клетки к другой. Поэтому, все вышеперечисленные факты усложняют верхний уровень управления, что организовать его невозможно для того, чтобы задать  $M_{эмi}$ , преодолевающие собственные нагрузки в каждой клетки, и скорости  $\omega_i$  - для обеспечения минимального необходимого натяжения в МКП, что и определяет равновесное состояние системы.

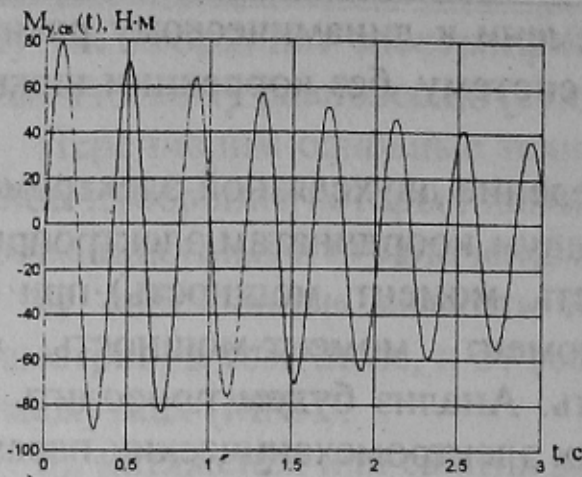
Поэтому, при формировании нижнего уровня управления необходимо выбрать замкнутые системы электроприводов с такой структурой регулируемых координат, которые приводили бы систему к динамическому равновесию для простых линейно-симметричных упругих связей, не прибегая к услугам верхнего уровня и, желательно, при любых значениях (в рамках существующих ограничений) задающих воздействий. Благодаря такой упругой связи и вольности выбора задающих воздействий, наиболее контрастно можно выделить те координаты электропривода, взаимодействие которых гарантировано

приводит за кратчайший период времени к динамическому равновесию простую электромеханическую систему, без коррекции нижнего уровня управления.

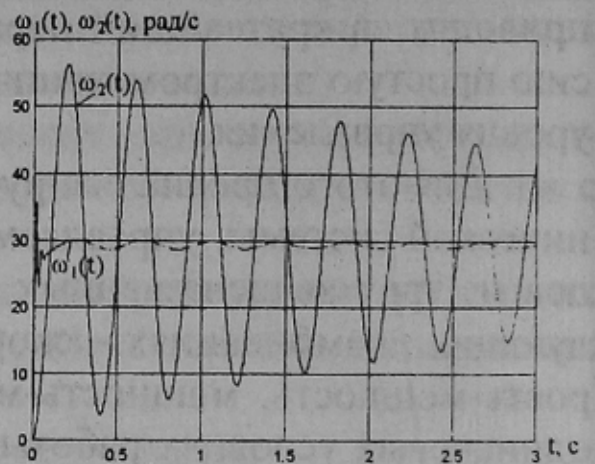
Для этого проанализируем поведение двухсвязной электромеханической системы, управляемой по двум координатам электроприводов из трех вышеназванных (скорость, момент, мощность) при следующих комбинациях: скорость-момент, момент-мощность, скорость-мощность, мощность-мощность. Анализ будем проводить при одинаковых условиях работы, равных электромеханических параметрах системы и параметрах регуляторов. А также будем считать, что собственные моменты нагрузок в очагах деформации  $M_{ci}$  известны и не зависят от состояния рабочего тела в МКП. Кроме того, допустим, что трансмиссии приводов идеально жесткие.

Прежде чем перейти к непосредственному анализу введем понятие - нормированное приведение, заключающееся в том, что при стационарном ведении процесса ( $V_i S_i = const$ ) все роторы двигателей вращаются с одинаковыми скоростями  $\omega_i$  при априори выбранных технологических вытяжках. Данная нормировка позволяет быстро анализировать теоретически полученные переходные процессы, которые только при условии достижения равновесия системы характеризуются выравниванием скоростей двигателей ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega_i$ ).

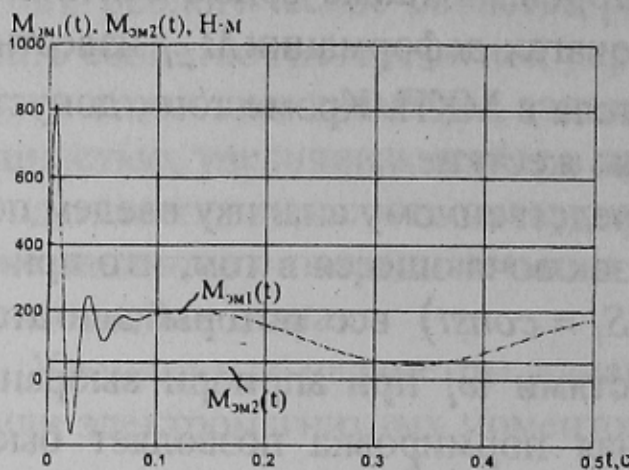
Анализ двухсвязной электромеханической системы, регулируемой по двум координатам скорость-момент. Данная пара регулируемых координат должна приводить простую электромеханическую систему в равновесное состояние. Переходная характеристика  $M_{y,cv}(t)$  (рис. 1.а), описывающая состояние рабочего тела в МКП, характеризуется затухающими колебаниями большой амплитуды. Такой вид механической связи обусловлен колебаниями электромагнитного момента привода по скорости. Привод по скорости поддерживает скорость двигателя на заданном уровне  $\omega_1 = 29 \frac{рад}{с}$  (рис. 1.б) и, в зависимости от реакции упругой связи, сбрасывает или поднимает свой электромагнитный момент (рис. 1.в). Как видно из (рис. 1.а,б), угловые скорости роторов двигателей постепенно сближаются к одному значению при одновременном уменьшении амплитуды колебаний упругой связи.



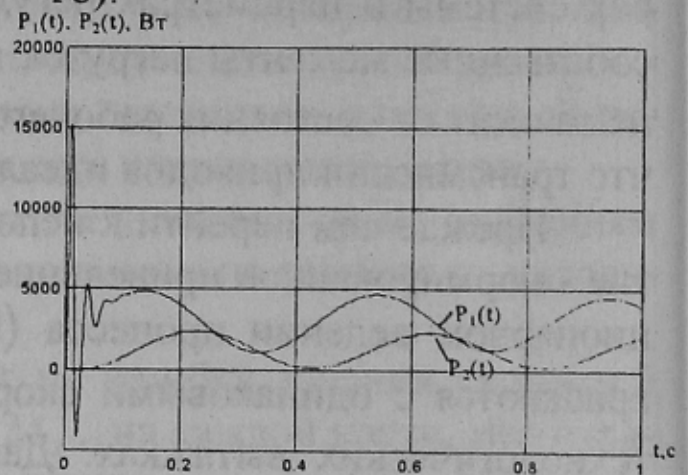
1а)



1б)



1в)



1г)

Рисунок 1 - Переходные процессы двухсвязной электромеханической системы, управляемой по координатам скорость-момент (параметры задания:  $\omega_1=29$  рад/с,  $M_{ЭМ2}=48$  Н·м,  $M_{c1}=70$  Н·м,  $M_{c2}=40$  Н·м).

$$\text{При равновесии: } M_{ЭМ1} = M_{c1} + M_{c2} - M_{ЭМ2}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что  $M_{ЭМ1}$  привода по скорости, может быть как отрицательным, так и положительным, в зависимости от заданного  $M_{ЭМ2}$  в приводе по моменту, и существующих нагрузках  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$ . Упругая связь при этом изменяется от натяжения к сжатию рабочего тела. Это происходит благодаря тому, что привод по скорости обязан сохранять заданную скорость, не смотря на то, что  $M_{ЭМ2}$  второго привода может быть задан на уровне  $M_{ЭМ2} > (M_{c1} + M_{c2})$  или  $M_{ЭМ2} < (M_{c1} + M_{c2})$ .

Итак, в случае выбора на нижнем уровне управления замкнутой системы электроприводов с координатами регулирования скорость-момент, можно обеспечить минимальное натяжение в МКП, но при ручной коррекции величины электромагнитного момента, который подбирается при настройке привода. Автоматически эта настройка не корректируется по причине отсутствия информации о моментах сопротивления деформации рабочего тела в каждой клетке. Данная структура требует индивидуального синтеза регуляторов, чтобы обеспечить приемлемый переходной процесс к равновесному состоянию названной системы. Иначе, при таких колебаниях в МКП рабочее тело, накапливая знакопеременную деформацию, может разрушиться.

Анализ двухсвязной электромеханической системы, регулируемой по двум координатам момент – мощность. Обратим внимание на введение новой координаты – электромагнитная мощность, ранее не упоминавшейся в теории электропривода [2, 3], в качестве полноправной («узаконенной») координаты регулирования.

Из анализа  $M_{y,cb}(t)$  (рис.2.а) наблюдается аналогичная картина состояния рабочего тела в МКП, но время установления переходного процесса  $t_{mn} = 2c$  гораздо меньше, по сравнению с  $t_{mn}$  в системе с парой скорость-момент. Пара приводов момент-мощность при равновесном состоянии выходит к одному определенному значению угловых скоростей двигателей (рис.2.б), т.к. в приводе по мощности  $P_2$  заключена информация о равновесной скорости системы при неизвестных нагрузках  $M_{c1}$  и  $M_{c2}$ , и заданном электромагнитном моменте  $M_{эм1}$  на первом приводе. При не потреблении энергии в упругой идеальной связи, что соответствует модели, можно написать для равновесного состояния: момент ( $M_{эм1}$ ) - мощность ( $P_2$ ):

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega = \frac{P_2}{(M_{c1} - M_{эм1}) + M_{c2}} \quad (2)$$

Знак ( $\pm$ ), получающийся от разности ( $M_{c1} - M_{эм1}$ ), влияет на состояние рабочего тела в МКП: знак минус соответствует его сжатию, а знак плюс – натяжению.

Итак, выбирая на нижнем уровне управления замкнутую систему электроприводов с координатами регулирования момент-мощность, можно привести систему к динамическому равновесию.

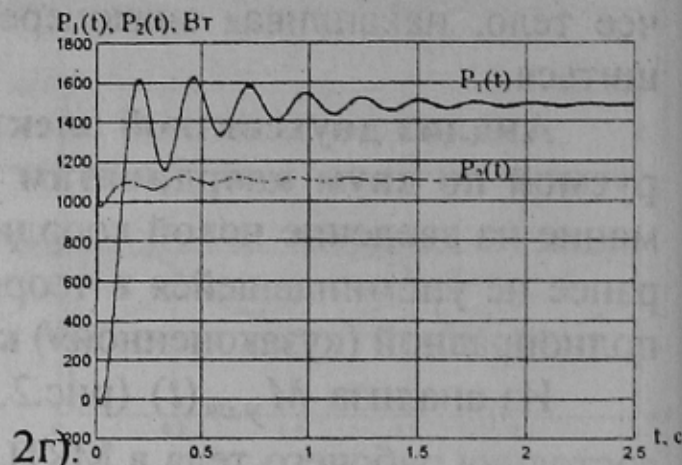
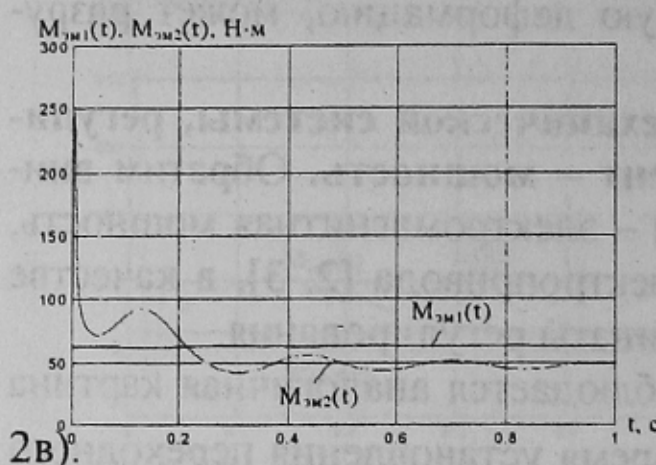
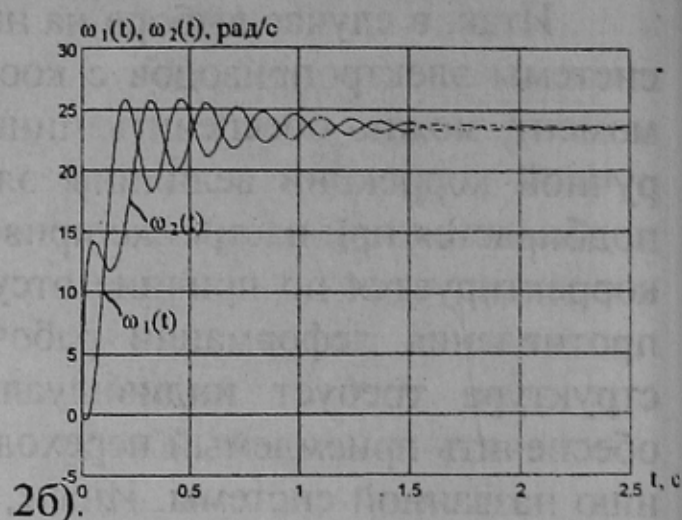
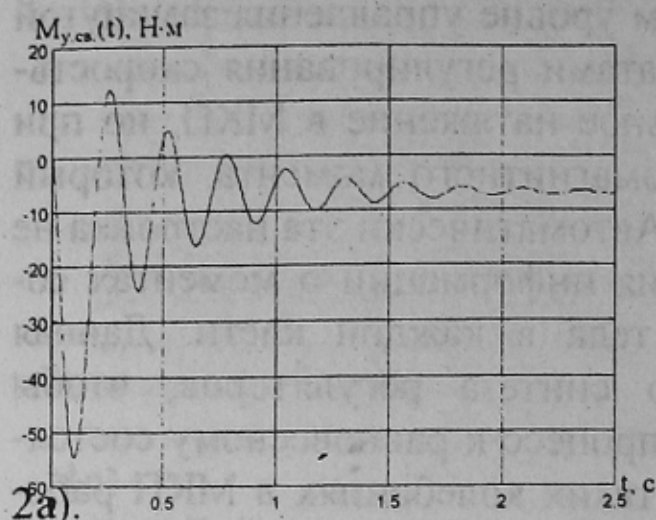


Рисунок 2 - Переходные процессы двухсвязной электромеханической системы, управляемой по координатам момент-мощность (параметры задания:  $M_{эм1} = 63 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $P_2 = 1100 \text{ Вт}$ ,  $M_{c1} = 70 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{c2} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ).

Но опять возникает проблема определения необходимого распределения активных  $M_{эм1}$  и  $P_2$ . Распределение неизвестных нагрузок определяет: будет ли привод по мощности растягивать материал в МКП, или первый привод будет способствовать его сжатию. Для реальной технологии последнее не допустимо. Но, пара координат момент-мощность по качеству лучше, чем пара скорость-момент. Причина более быстрого выхода первой пары на равновесное состояние в том, что система регулирования привода мощности, не диктует объекту на какую скорость необходимо выйти в конце переходного процесса. Электродвигатель, управляемый по мощности, сам выбирает эту скорость в зависимости от объективной ситуации распределения

нагрузок, значительно быстрее, по сравнению с теми парами приводов, где привод мощности отсутствует.

Анализ двухсвязной электромеханической системы, регулируемой по двум координатам скорость - мощность. Преимущество пары скорость-мощность по отношению к паре момент-мощность в том, что в первой структуре скорость ведения процесса задана на конкретном уровне, благодаря первому регулятору скорости  $\omega_1$ .

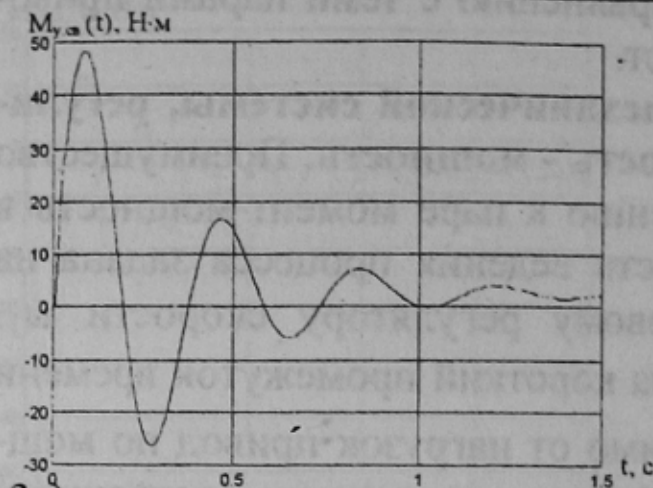
$M_{y.cв}(t)$  (рис. 3.а) устанавливается за короткий промежуток времени 1,5 с. Из рис.3.б видно, что независимо от нагрузок привод по мощности приводит свою скорость  $\omega_2(t)$  в установившемся состоянии к заданной скорости привода по скорости  $\omega_1(t)$  ( $\omega_1(t) = \omega_2(t) = 29 \frac{рад}{с}$ ).

Т. е., двухсвязная электромеханическая система с координатами регулирования скорость-мощность, всегда находит свое равновесие. Состояние этой системы также зависит от неизвестного распределения нагрузок. Для того чтобы оба привода совершали положительную работу над рабочим телом в МКП (рис.3.в), необходимо выполнить условие, вытекающее из равновесного выражения (2), только здесь известна другая пара параметров  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  и  $P_2$ :

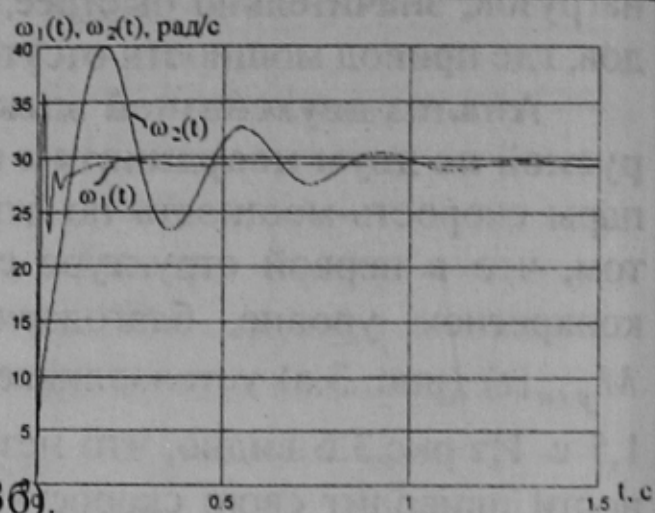
$$M_{эм1} = M_{с1} - \frac{P_2 - \omega M_{с2}}{\omega} \quad (3)$$

Поэтому, если правая часть выражения (3) будет положительной величиной, тогда привод скорости совершает положительную работу. Напротив, если  $P_2 > \omega M_{с2}$  и, к тому же, преодолевает нагрузку первого привода  $M_{с1}$ , то привод скорости будет сопротивляться совместному движению приводов, стабилизируя при этом заданную скорость  $\omega_1$ , которая и будет равновесной.

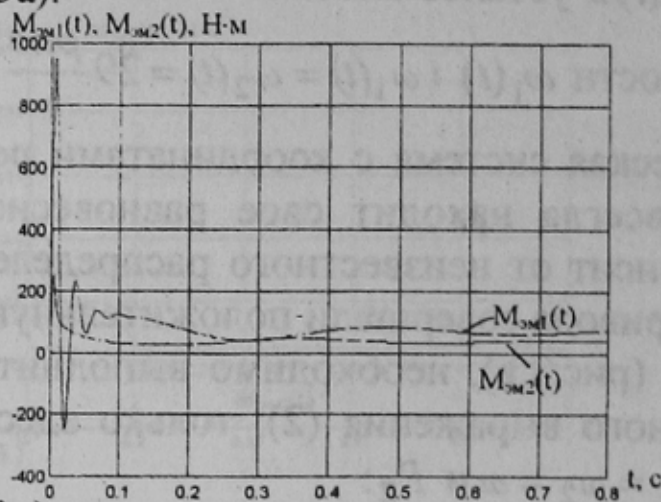
Поэтому данная система для нижнего уровня управления очень удобна. Систему с таким выбором регулируемых координат удобно применять в тех технологиях, где привод по скорости должен быть основным, а по мощности дополнительным. Поэтому замкнутая система электроприводов скорость-мощность на нижнем уровне управления применяется для ограниченного числа технологических процессов, что вносит субъективный фактор в процесс управления многосвязной электромеханикой при применении этой структуры регулируемых координат.



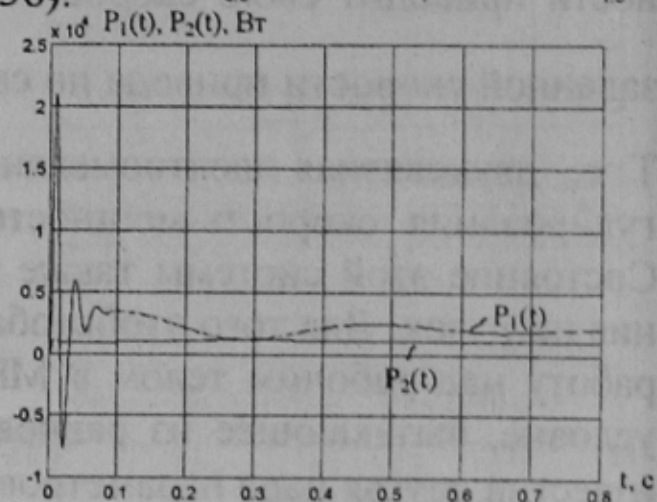
3а).



3б).



3в).



3г).

Рисунок 3 - Переходные процессы двухсвязной электромеханической системы, управляемой по координатам скорость-мощность (параметры задания:  $\omega_1=29$  рад/с,  $P_2=1100$  Вт,  $M_{c1}=70$  Н·м,  $M_{c2}=40$  Н·м).

Анализ двухсвязной электромеханической системы, регулируемой по двум координатам мощность – мощность (рис. 4). Для многосвязной электромеханической системы, регулируемой по координатам мощность-мощность...- мощность, запишем уравнение со-

хранения энергии в стационарном режиме: 
$$\sum_{i=1}^n M_{c i} \omega_i = \sum_{i=1}^n P_{\omega i}$$

Из уравнения равенства активных и пассивных мощностей, учитывая нормированное приведение элементов трансмиссий механической части к роторам двигателей, найдем их угловые скорости, которые установятся в одном значении после переходного процесса (рис. 5.б).

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_{равнов.} = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{\omega i}}{\sum_{i=1}^2 M_{c i}} = (500 + 1100) / (70 + 40) = 15 \left( \frac{рад}{с} \right)$$



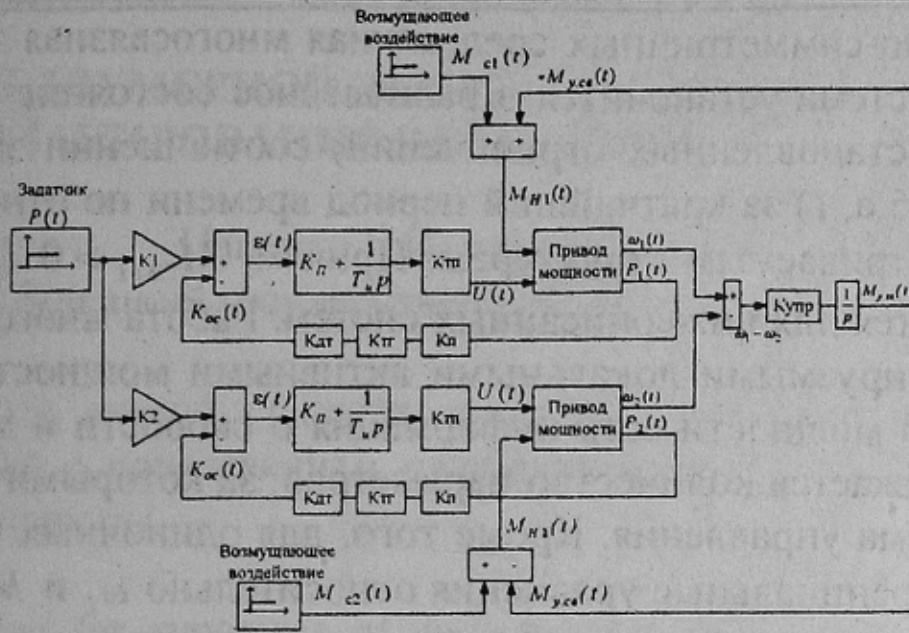


Рисунок 4 - Структурная схема двухсвязной электромеханической системы, управляемой по двум координатам мощность-мощность.

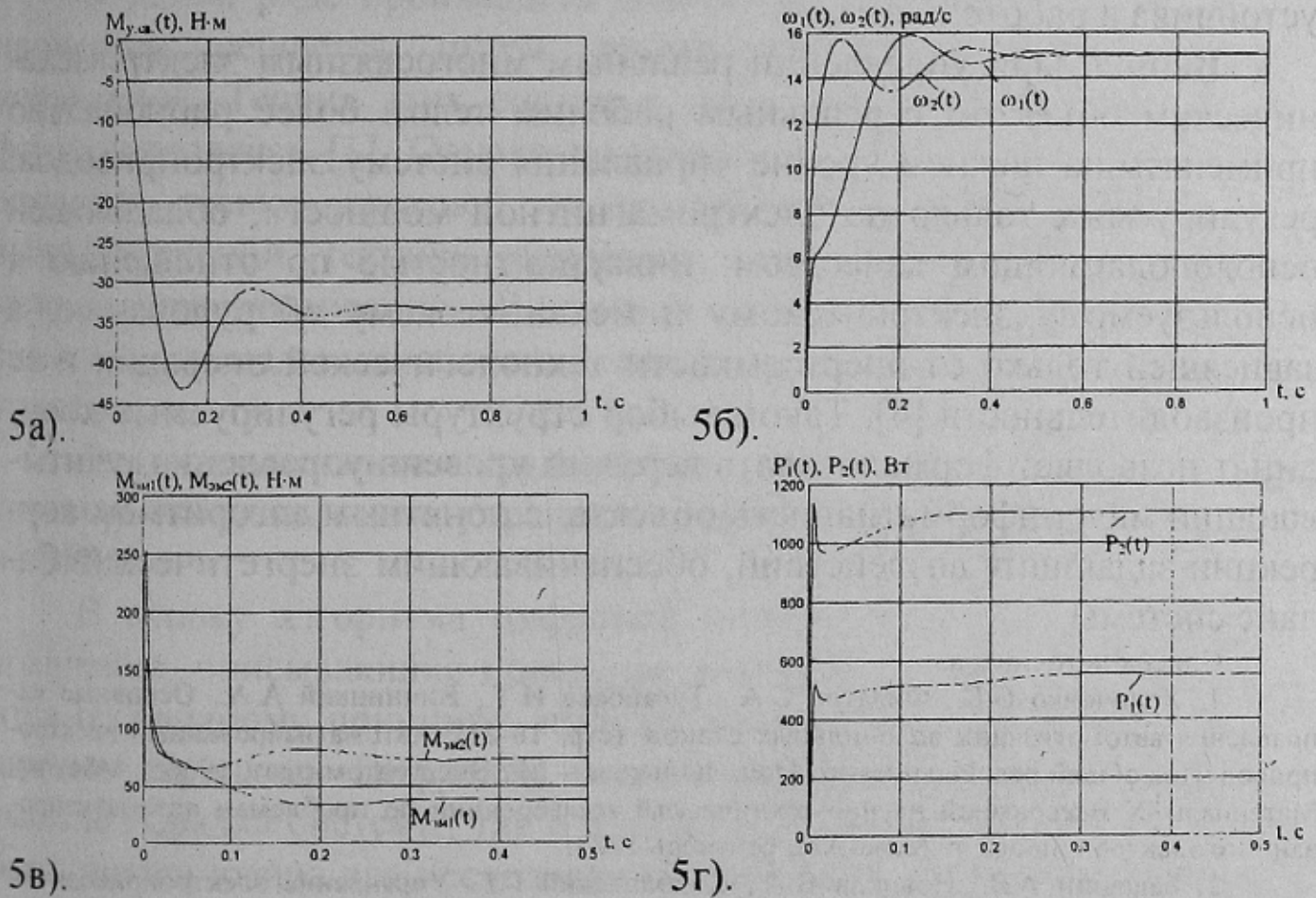


Рисунок 5 - Переходные процессы двухсвязной электромеханической системы, управляемой по координатам мощность-мощность (параметры задания:  $P_1=500$  Вт,  $P_2=1100$  Вт,  $M_{c1}=70$  Н·м,  $M_{c2}=40$  Н·м).

Для линейно-симметричных сред данная многосвязная электро-механическая система установится в равновесное состояние при любом (в рамках установленных ограничений) соотношении заданных мощностей (рис.5.а, г) за кратчайший период времени по отношению к другим рассматриваемым структурам. Причем,  $M_{эмi} > 0$  (рис.5.в), что не выполняется для нижеописанных систем. Работа многосвязной системы с регулируемыми локальными активными мощностями более устойчива. В мощности есть информация о скорости и моменте, тем самым, понижается количество параметров, за которыми и должна следить система управления. Кроме того, для одиночных электроприводов дифференциальные уравнения относительно  $\omega_i$  и  $M_{эмi}$  есть уравнения второго порядка, а для баланса мощностей состояние объекта характеризуется уравнением первого порядка. С точки зрения теории регулирования, чем меньше порядок системы, тем она более устойчива в работе.

**Вывод.** При управлении реальным многосвязным электро-механическим объектом с реальным рабочим телом более рационально применять на нижнем уровне управления систему электроприводов, регулируемых только по электромагнитной мощности, обладающей основополагающим качеством: инвариантностью по отношению к используемому электрическому и механическому оборудованию, а зависящей только от энергоемкости технологической операции и ее производительности [4]. Такой выбор структуры регулируемых координат позволяет формализовать верхний уровень управления, учитывающий малоинформативность объекта, с понятным алгоритмом коррекции задающих воздействий, обеспечивающим энергетический баланс системы.

Список источников.

1. Храпченко О.К., Филатов С.А., Туганбаев И.Т., Винницкий А.А., Основные направления автоматизации волочильных станов. (стр. 18-21). Автоматизированный электропривод /Под общей ред. Ильинского Н.Ф., Юнькова – М.: Энергоатомиздат, 1986г., 448с., ил. Материалы X Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам автоматизированного электропривода, г. Алма-Ата, сентябрь 1983г.

2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982 г., 392 с., ил.

3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебное пособие для вузов., 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1998г., 704 с., ил.

4. Жукова Н.В. Управление многосвязной электро-механической системой при обработке металла давлением. – Наукові праці Дон ГТУ, серія "Обчислювальна техніка та автоматизація", випуск 20: Донецк: ДонГТУ, 2000, стр.47-55.