

В.С.Хилов, д-р техн. наук,

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ “Национальный горный университет”)

С.В. Самуся, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, ИГТМ НАН України ім. Полякова)

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТУРА ТОКА ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СТАВА БУРОВОГО СТАНКА

Введение. Внедрение приводных систем переменного тока на горных машинах с одновременным повышением массы рабочего органа приводит попаданию собственных частот колебаний механической части привода в полосу пропускания контуров управления [1].

Цель работы. Основной целью проведенных в данной работе исследований, является определение на основе оценки динамико-информационных характеристик редуцированной передаточной функции контура тока.

Материалы и результаты исследования. Передаточная функция дополнительного динамического звена в контуре тока $W_1(p)$, обусловленная наличием оборотной ЭДС, канатно-полиспастной системы и гидропередачи, находится как отношение полиномов числителя и знаменателя в шестой степени [2]:

$$W_1(p) = \frac{\sum_{n=0}^6 a_{n1} p^n}{\sum_{n=0}^6 b_{n1} \cdot p^n},$$

где a_{n1}, b_{n1} – коэффициенты, определяемые параметрами объекта управления [3]; p – оператор Лапласа.

Таким образом, упругие свойства трансмиссии приводят к появлению дополнительных нулей и полюсов в замкнутой передаточной функции контура тока, что отрицательно сказывается на качестве управления контура, особенно в начале подъема собранного става. Традиционный полюс $P_I = 1/T_I$ (T_I – электромагнитная постоянная времени) объекта управления контура тока привода спускоподъемных операций непосредственно не проявляется, а входит как составляющая часть в остальные полюсы и нули объекта управления.

Поэтому при настройке контура на технический оптимум классическая передаточная функция регулятора тока должна иметь следующий вид:

$$W_{PT}(p) = \frac{T_I \cdot p + 1}{T_{OT} \cdot p} \frac{\sum_{n=0}^6 b_{n1} \cdot p^n}{\sum_{n=0}^6 a_{n1} \cdot p^n},$$

где T_{OT} – постоянная времени контура тока.

Последнее динамическое звено является достаточно сложным регулятором в реализации, так как необходимо знать производные высокого порядка (до шестого включительно) от сигнала рассогласования. Кроме того, регулятор должен обладать свойствами адаптации или робастности в результате изменения жесткости канатно-полиспастной системы и веса става.

Оценим влияние на качество управления контура тока динамического звена $W_1(p)$ при настройке регулятора на компенсацию электромагнитной постоянной времени контура (классический регулятор с классической настройкой).

Для нахождения динамической характеристики регулятора, обеспечивающего удовлетворительное качество переходного процесса контура при наличии трансмиссии, понизим порядок передаточной функции объекта управления контура. Для этого оценим расположение нулей и полюсов динамического звена $W_1(p)$ на комплексной плоскости.

Карта расположения нулей и полюсов разомкнутого контура регулирования тока на комплексной плоскости рассчитана по исходным данным бурового станка СБШС-250Н для начала подъема полностью собранного става. Корни характеристического уравнения (полюса P) и нули разомкнутого контура тока (Z) с учетом влияния трансмиссии и ее диссипативных сил расположены соответственно рис. 1 (в полосе пропускания контура тока).

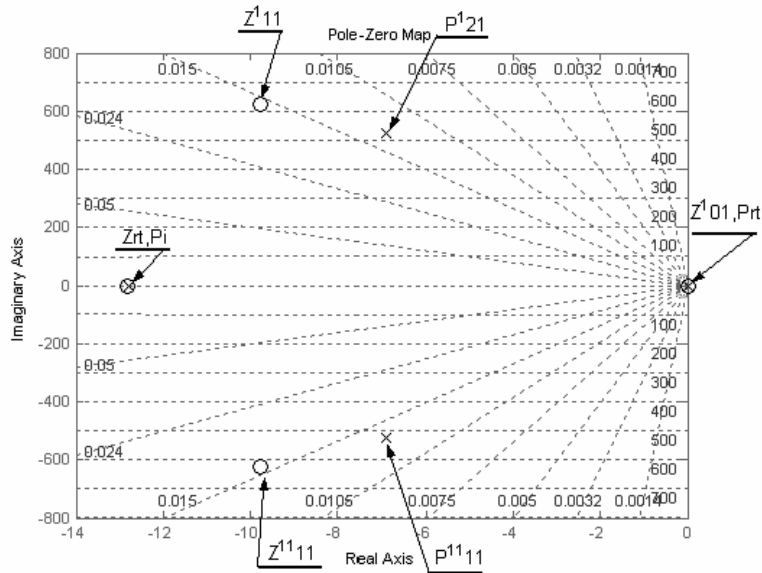


Рис. 1. Карта расположения нулей P и полюсов Z объекта управления контура тока, полупроводникового преобразователя и регулятора тока

Определим доминирующие составляющие переходного процесса в исследуемом контуре. Для этого оценим значения нулей и полюсов дополнительной передаточной функции в разомкнутом контуре тока, определяемой влиянием обратной ЭДС, гидропривода и канатно-полиспастной системы.

Это позволит не учитывать скомпенсированные нули и полюса, а также отбросить не значимые корни характеристического уравнения, которые наиболее удалены от мнимой оси на комплексной плоскости, что в итоге приведет к упрощению передаточной функции $W_1(p)$ и соответственно искомым передаточной функции регулятора тока.

Из восьми полюсов передаточной функции разомкнутого контура тока с учетом влияния диссипативных сил в трансмиссии: один (P_{rt}) расположен в начале координат, другой (P_{T_m}) находится на вещественной оси, три пары ($P'_{21}, P''_{21}, P'_{41}, P''_{41}, P'_{61}, P''_{61}$) имеют комплексно-сопряженные значения.

Что касается восьми нулей функции, то: один ноль (Z'_{01}) находится в начале координат, другой (Z_{rt}) – на вещественной оси абсцисс, три пары – ($Z'_{11}, Z''_{11}, Z'_{31}, Z''_{31}, Z'_{51}, Z''_{51}$) комплексно-сопряженные.

Причем, кроме двух полюсов ($P'_{61}, P''_{61}, Z'_{31}, Z''_{31}$), все остальные комплексно-сопряженные нули и полюса ($Z'_{31}, Z''_{31}, Z'_{51}, Z''_{51}, P'_{21}, P''_{21}, P'_{41}, P''_{41}$), которые существенно отличаются по числовым значениям. Поэтому для рассматриваемого контура регулирования расположения нулей и полюсов определяющими являются полюса $P'_{21}, P''_{21}, P'_{41}, P''_{41}$ и нули $Z'_{31}, Z''_{31}, Z'_{51}, Z''_{51}$.

На качество переходного процесса практически не будут влиять характеристические частоты, определяемые корнями:

- P'_{61}, P''_{61} , так как постоянные времени переходного процесса имеют значительно меньшее значение (на два порядка), чем от других корней, то они практически мгновенно затухают до нулевого значения;
- $P'_{61}, Z'_{61}, P''_{61}, Z''_{61}$ – эти полюса и нули взаимно компенсируются, так как мнимые части корней практически равны между собой, а расстояния между действительными частями этих корней отличается не более чем на 10%;
- P'_{41}, P''_{41} – они находятся вне полосы пропускания контура тока;
- Z'_{51}, Z''_{51} – эти нули на динамические процессы практически не влияют, поскольку полностью компенсируются соответствующими полюсами динамического звена объекта управления.

При исследовании контура на характер переходного процесса наибольшее влияние (доминирующее) оказывают характеристические частоты, которым соответствуют корни полинома числителя Z'_{11}, Z''_{11} и корни полинома знаменателя P'_{21}, P''_{21} . Причем корни – комплексно сопряженные.

Поэтому редуцированная передаточная функция объекта управления при подъеме полностью собранного става и максимальной длине каната может быть представлена в следующем виде:

$$W_{ped1}(p) = T_{ЭМ1} p (T_{11}^2 p^2 + 2 \cdot x_{11} T_{11} p + 1) / (T_{21}^2 p^2 + 2 \cdot x_{21} T_{21} p + 1).$$

Передаточные функции разомкнутого и замкнутого контуров тока при компенсации регулятором тока электромагнитной постоянной времени контура, с учетом диссипативных сил и редуцированной передаточной функции объекта управления принимают следующий вид:

$$W_{razt1}(p) = \frac{(T_I p + 1) T_{ЭМ1} (T_{11}^2 p^2 + 2x_{11} T_{11} p + 1)}{T_{OT} (p T_m + 1) (T_{21}^2 p^2 + 2x_{21} T_{21} p + 1)}, \quad W_{zrt1}(p) = \frac{T_{ЭМ1}}{T_{ЭМ1} + T_{OT}} \frac{\sum_{m=0}^3 a_{m1}'' p^m}{\sum_{m=0}^3 b_{m1}'' p^m},$$

где значения коэффициентов определяются исходными значениями объекта управления [4].

Оценку устойчивости замкнутого контура тока с полной передаточной функцией объекта управления удобно произвести на основе критерия Найквиста. Передаточная функция разомкнутого контура тока при классической настройке регулятора на компенсацию электромагнитной постоянной времени

$$W_{razt1}(p) = \frac{(T_I p + 1)}{T_{OT} p} \frac{1}{p T_m + 1} \frac{1}{p T_I + 1} \frac{T_{ЭМ1} p (p T_I + 1)}{T_{ЭМ1} p (p T_I + 1) + 1} \cdot \frac{\prod_{i=1,3,5} (T_{i1}^2 p^2 + 2x_{i1} T_{i1} p + 1)}{\prod_{j=2,4,6} (T_{j1}^2 p^2 + 2x_{j1} T_{j1} p + 1)}$$

На рис. 2 изображен годограф Найквиста, из которого следует, что амплитудно-фазовая характеристика при подъеме полностью собранного става и максимальной длине канатов проходит вблизи точки $(-1, j \cdot 0)$, а это соответствует колебательной устойчивости замкнутого контура тока. При уменьшении длины канатов и веса до значения веса только головки бурового снаряда контур становится абсолютно устойчивым, так как годограф переходит в правую полуплоскость и удаляется от точки $(-1, j \cdot 0)$, т.е. проблема с влиянием на качество управления контура тока возникает при перемещении полностью собранного става в начале его подъема.

Наличие коэффициентов при нечетных степенях в знаменателе передаточной функции свидетельствует о демпфирующей способности контура за счет динамических свойств регулятора тока даже при отсутствии диссипации в объекте управления.

Как следует из приведенных частотных зависимостей (рис. 3), редуцированная передаточная функция хорошо аппроксимирует дополнительную передаточную функцию в контуре тока. Поэтому в первом приближении принимаем порядок полиномов числителя и знаменателя дополнительной передаточной

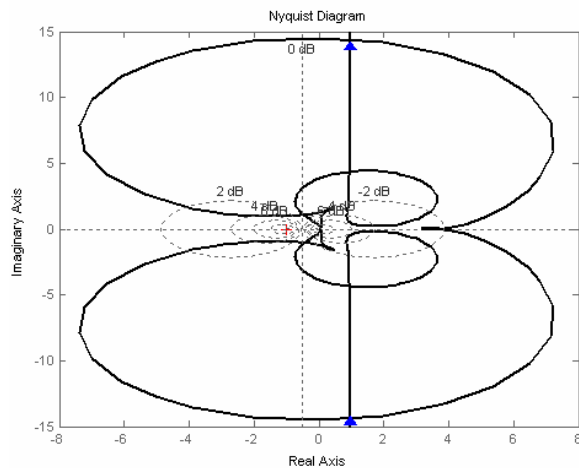


Рис. 2. Годограф Найквиста для разомкнутого контура тока при минимальной жесткости канатов и максимальном моменте инерции става (начало подъема полностью собранного става)

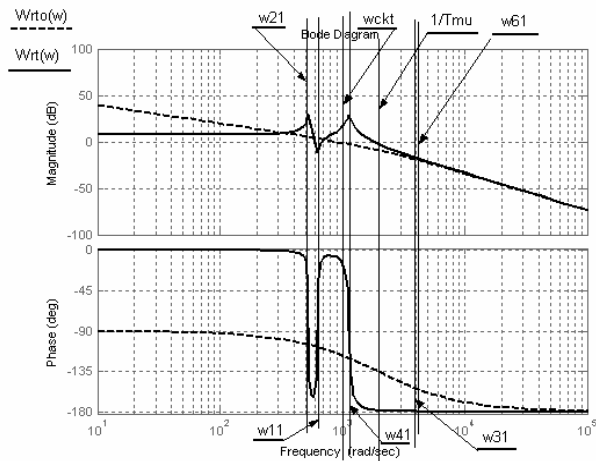


Рис. 3. Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики разомкнутого контура тока с редуцированной передаточной функцией объекта управления

функции в контуре тока, обусловленной наличием обратной ЭДС и упругими свойствами трансмиссии, третьего порядка в числителе и второго порядка – в знаменателе.

Современные системы с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения работают на частоте свыше 4 кГц, поэтому они обладают настолько малой инерционностью ($T_m = 0,0005c$), поэтому на практике постоянная времени интегрирования контура тока выбирается большей величиной чем величина $a_T \cdot T_m$ (где $a_T = 2$ – при настройке контура на модульный оптимум). При таких значениях T_m^2 является величиной второго порядка малости, которой можно пренебречь в коэффициентах знаменателя замкнутого контура тока с учетом редуцированного дополнительного звена.

Таким образом, контур тока при применении классического регулятора тока с ПИ-динамической характеристикой и настройкой на компенсацию электромагнитной постоянной времени T_I с учетом редукации порядка передаточной функции объекта управления

$$W'_{зкм}(p) = \frac{1}{1 + \frac{a_T T_m}{T_{ЭМ1}}} \cdot \frac{\sum_{n=0}^3 a_{n1}''' p^n}{\sum_{n=0}^3 b_{n1}''' p^n},$$

где a_T, T_m – коэффициент настройки контура тока и малая некомпенсируемая постоянная времени полупроводникового преобразователя.

Значения коэффициентов сведены в таблице.

Таблица

Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя	
a_{n1}'''	b_{n1}'''
$2 \cdot x_{11} \cdot T_{11} + T_I$	$\frac{T_I \cdot T_{ЭМ1} + 2 \cdot x_{11} \cdot T_{11} \cdot T_{ЭМ1} + 2 \cdot x_{21} \cdot T_{21} \cdot T_{OT}}{T_{OT} + T_{ЭМ1}}$
$2 \cdot x_{11} \cdot T_{11} \cdot T_I + T_{11}^2$	$\frac{T_{OT} \cdot T_{21}^2 + 2 \cdot x_{11} \cdot T_I \cdot T_{ЭМ1} \cdot T_{11} + T_{11}^2 \cdot T_{ЭМ1}}{T_{OT} + T_{ЭМ1}}$
$T_I \cdot T_{11}^2$	$\frac{T_{ЭМ1} \cdot T_I \cdot T_{11}^2}{T_{OT} + T_{ЭМ1}}$

В таблице обозначено: $T_{11}, T_{21}, x_{11}, x_{21}$ – постоянные времени и коэффициенты демпфирования колебательных звеньев числителя и знаменателя; $T_{ЭМ1}$ – электрохимическая постоянная времени.

Из последнего уравнения следует, что коэффициент передачи замкнутого контура тока зависит от множителя $1/(1 + a_T \cdot T_m / T_{ЭМ1})$, величина которого зависит от значения электрохимической постоянной времени $T_{ЭМ1}$.

На качество управления током будут влиять численные значения коэффициентов числителя и знаменателя, которые изменяются в зависимости от длины каната и числа присоединенных буровых штанг.

С увеличением жесткости канатов и с уменьшением веса става частоты собственных колебаний объекта управления увеличиваются, причем численные значения частот $w_{kt3} \approx w_{kt6}$ еще в большей степени начинают совпадать, что свидетельствует о взаимной компенсации динамических свойств полиномов числителя и знаменателя. Контур тока в целом представляет собой фильтр низкой частоты и эффективно подавляет высокочастотные колебания с частотой выше его частоты среза, а поэтому по мере подъема става с уменьшением длины канатов влияние динамики упругих свойств трансмиссии уменьшается.

Выводы. Колебательные звенья, входящие в передаточную функцию дополнительного динамического звена контура тока, сравнительно легко могут быть учтены при настройке регулятора тока в двух случаях: если собственные частоты колебаний значительно меньше или больше частоты среза контура тока ($w_{ckt} = 1/(a_T \cdot T_m)$).

В случае низкочастотных колебательных звеньев в дополнительном динамическом звене практически возможна настройка ПИ – регулятора тока на компенсацию электромагнитной постоянной времени контура тока. В окрестностях частоты среза система обладает хорошим запасом как по фазе, так и по амплитуде. При этом ни обратная ЭДС, ни упругие свойства трансмиссии существенно не влияют на качество работы контура.

При наличии высокочастотных составляющих в дополнительном динамическом звене существенно искажаются частотная и фазовая характеристики в окрестностях частоты среза в результате влияния обо-

ротной ЭДС статора. Для этого необходимо изменить алгоритм работы регулятора тока и применить PII^2 -регулятор. Влиянием на качество работы контура трансмиссии в этом случае можно пренебречь.

Таким образом, в полосе пропускания контура тока находятся нули и полюса объекта управления $Z'_{01}, Z''_{01}, Z'_{11}, Z''_{11}, P'_{21}, P''_{21}$, а за полосой пропускания – нули и полюса $P'_{41}, P''_{41}, P'_{61}, P''_{61}, Z'_{31}, Z''_{31}$, которые не будут существенно влиять на качество переходного процесса. Характеристические частоты $Z'_{31}, Z''_{31}, P'_{61}, P''_{61}$ близки по значениям и полностью компенсируют взаимное влияние на динамику контура управления. Кроме того, необходимо учитывать, что по мере выбора каната, и соответственно количества перемещаемых штанг характеристические частоты колебаний смещаются в сторону больших значений на комплексной плоскости, т.е. будут увеличиваться собственные частоты колебаний и демпфирующая способность контура.

Регулятор тока при классической настройке не подавляет ни один из полюсов объекта управления контура (P_{r1}, Z_{r1}), а наличие форсирующего элемента в объекте управления (Z'_{01}) из-за существенного влияния оборотной ЭДС приводит к потере астатизма разомкнутого контура тока.

Список литературы

1. Хилов, В.С. Опыт применения частотно-управляемых приводов в буровых станках карьеров Украины [Текст]/ В.С.Хилов., А.С. Бешта, В.Т.Заика // Горный информ.- аналит. бюл., М, .МГГУ, – 2004. – №10. С. 285-289.
2. Хилов, В.С. Математическая модель гидропривода подачи станка шарошечного бурения [Текст]/ В.С.Хилов // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2003. – Вип.70. – С. 100-105.
3. Хилов, В.С. Математическая модель объекта управления привода подачи бурового станка [Текст]/ В.С.Хилов // Сб. научн. трудов НГУ. – 2004. – №19, т.2. – С.33-39.
4. Хилов, В.С. Синтез позиционной системы управления гидравлическим приводом подачи станка шарошечного бурения [Текст]/ В.С.Хилов // Сб. научн. трудов НГУ. – 2003. – №17, т.2. – С.122-127.
5. Бешта, А.С. Принципы построения системы управления электроприводом спуско-подъемных операций / А.С.Бешта, В.С. Хилов // Вісн. Кремен. держ. політехн. ун-ту: наук. праці КДПУ. – 2004. – Вип.4(20) . – С.85-88.

Рекомендовано до друку: проф. Бештою О.С.