

УДК 62-501.14:519.2

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ВЫСОКОТОЧНОГО ПРИВОДА С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Докт. техн. наук проф. ГАНЭ В. А., асп. АХМЕД Н. Т.

Белорусский национальный технический университет

Актуальность тематики работы обусловлена необходимостью модернизации информационных систем комплексов специального назначения. Постановка задачи модернизации привода обосновывается по степени робастности. В системах автоматического слежения по направлению на базе функционально необходимых элементов (ФНЭ) формируется управляющее устройство в форме ПИД-регулятора. Следовательно, параметры функционально необходимых элементов определяют параметры управляющего устройства, а значит, точность и качество слежения за угловыми координатами объектов. Проектируются штатные номинальные структуры желаемого управляющего устройства с постоянными параметрами, выбираемыми по критериям точности слежения. Спроектированный ПИД-регулятор выполняет роль «эталонного управляющего устройства». При его практи-

ческой реализации на элементах привода необходимо выявить изменения неконтролируемых параметров и охарактеризовать их отклонения. Впоследствии нужно компенсировать влияние этих отклонений от эталонных значений на точность слежения за угловыми координатами. Этого можно достичь построением робастного управляющего устройства на базе элементов привода с переменными неконтролируемыми параметрами.

Силовые следящие системы (ССС) предназначены для вращения объектов большой массы и инерции, что требует в свою очередь большой мощности управления. Выходной координатой ССС обычно является угол поворота вала, поэтому для реализации таких перемещений служат электродвигатели и гидродвигатели. В связи с этим силовые следящие системы являются преимущественно электромеханическими или электрогидравлическими. Наземные силовые следящие системы могут работать в составе радиолокационных станций (РЛС). Бортовые силовые следящие системы применяются в рулевых приводах автопилотов, для изменения геометрии крыла, приведения в действие антенн РЛС и установок наведения с высокой точностью слежения, а также для регулирования тяги двигателей. Силовые следящие системы классифицируют по принципу управления, типу исполнительного механизма, способу реализации управления и назначению.

По принципу управления силовые следящие системы подразделяются на системы управления по отклонению, возмущению и с комбинированным управлением.

На рис. 1 и 2 приведены функциональные схемы силовых систем, работающих по этим принципам. В качестве примеров выбраны электромеханическая следящая система за углом поворота антенной системы радиолокационной станции (рис. 1) и комбинированная силовая следящая система с электрическим исполнительным элементом (рис. 2). Функционально необходимые элементы этих систем показаны в виде прямоугольников, соединенных между собой линиями связи, они имеют следующие обозначения: ИР – измеритель рассогласований; УПЭ – усилительно-преобразовательные элементы; ИД – исполнительный двигатель; Р – понижающий редуктор; ОУ – объект управления; ЦК – цепь компенсации динамических ошибок; ДС – датчик угловой скорости вращения исполнительного двигателя.

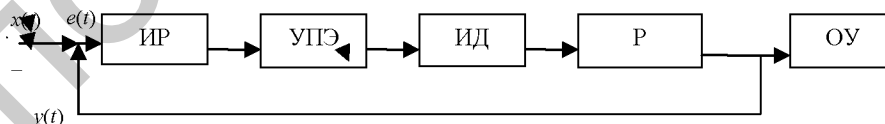
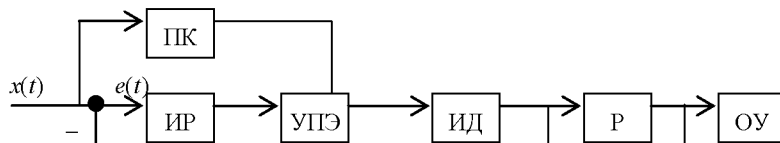


Рис. 1. Электромеханическая следящая система

В основе работы системы рис. 1 лежит принцип управления по отклонению. Его особенность состоит в том, что сигнал управления вырабатывается независимо от причины отклонения регулируемой координаты от заданного значения, т. е. в результате изменения управляющего сигнала или под действием внешнего возмущения. Эта особенность принципиально важна при создании систем управления антеннами (СУА) РЛС. Таким си-

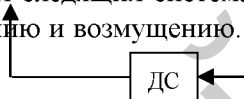
стемам свойственны: наличие замкнутого контура управления, основанного на сравнении поступающего от датчика сигнала с сигналом, поступающим по каналу обратной связи с выхода системы; обязательное наличие ошибки рассогласования, используемой для управления исполнительным двигателем; не прямое управление, при котором для усиления сигнала



ошибки применяются усилительно-преобразовательные элементы (УПрЭ), возможность дистанционного управления.

Рис. 2. Комбинированная силовая следящая система

В комбинированных силовых следящих системах чаще применяют сочетание управления по отклонению и возмущению. На рис. 2 цепь компен-



сации служит для компенсации ошибки от задающего воздействия, а датчик скорости вращения исполнительного двигателя образует внутренний контур регулирования скорости выходной координаты. Комбинированные системы по сравнению с другими системами работают точнее и обеспечивают устойчивость более простыми средствами.

Одним из основных классификационных признаков силовых следящих систем является тип исполнительного механизма, который определяет необходимые элементы, структуру привода и средства коррекции. В качестве исполнительной части силовой следящей системы могут быть использованы следующие приводы: электрический двигатель постоянного или переменного тока в сочетании с понижающим редуктором; электрогидравлический привод, содержащий электродвигатель в сочетании с гидравлической передачей; электрический двигатель в сочетании с блоком муфт вязкого трения.

По способу управления различают силовые следящие системы с непрерывным управлением; с дискретным управлением, которое в свою очередь подразделяется на импульсное, релейное и цифровое. Рассмотрим силовую следящую систему с исполнительным двигателем постоянного тока, которая является исполнительной частью системы автоматического слежения по направлению (АСН). Обобщенная функциональная схема силовой следящей системы предназначена для вращения антенной системы (А) радиолокационной станции. Конструктивно антенная система имеет две оси вращения и снабжается двумя СУА, обеспечивающими вращение антенн по азимуту $\epsilon(t)$ (ось 1) и перемещение по углу места $\epsilon\beta(t)$ (ось 2).

При отклонении цели от оси антенной системы угловой дискриминатор (УД) приемного устройства измеряет это отклонение по азимуту и углу места и преобразует его в электрические напряжения. Эти напряжения после предварительного усиления с помощью УПрЭ подаются на управляю-

шие обмотки электромашинных усилителей (ЭМУ) и, усиленные с помощью ЭМУ, подаются на исполнительные двигатели. Двигатели через понижающие редукторы поворачивают антенную систему одновременно по азимуту и углу места до тех пор, пока ось антенной системы не совместится с направлением на цель. Ручное управление антенной системой осуществляется с помощью дополнительной следящей системы, включенной в канал движения антенны по азимуту. Для этого используют два сельсина: сельсин-датчик $СД_{\beta}$, соединенный с ручкой управления на пульте оператора, и сельсин-приемник $СП_{\beta}$, ротор которого вращается по азимуту вместе с осью 1 антенны. Если задающий и принимающий валы и связанные с ним сельсины находятся в согласованном положении, то напряжение сигнала ошибки равно нулю и исполнительный двигатель $ИД_{\beta}$ обесточен. При отклонении любого из валов от положения согласования выходное напряжение $СП_{\beta}$ через УПрЭ и ЭМУ обеспечивает включение азимутального двигателя и вращение антенны по азимуту. Для зрительного определения координат цели используются отсчетные устройства в виде подвижных шкал $Ш_{\beta}$, $Ш_{\epsilon}$ и неподвижных указателей, закрепленных непосредственно или через передаточные механизмы на соответствующих осях вращения антенны.

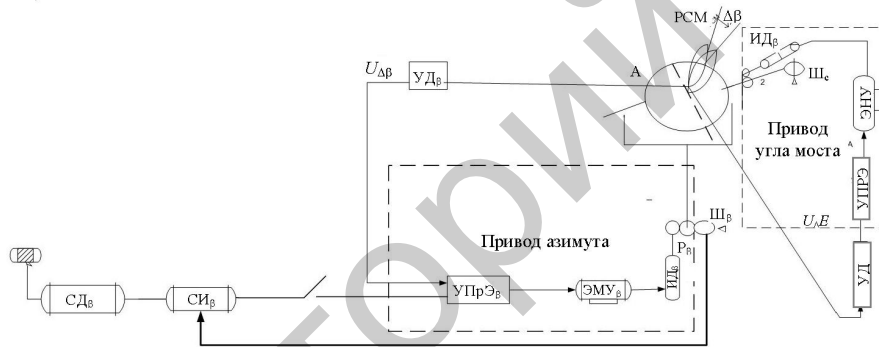


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема силовой следящей системы

При ручном управлении антенной системой в качестве УПрЭ могут использоваться фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), усилитель постоянного тока (УПТ). Задающим воздействием $x(t)$ для ССС является угол поворота вала сельсин-датчика, выходной переменной $y(t)$ для ССС считаем угол поворота антенной системы (рис. 3).

Упрощенная функциональная схема силовой следящей системы представлена на рис. 4.

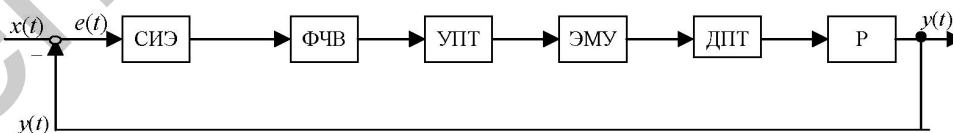


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема силовой следящей системы

На рис. 4 конкретизированы ФНЭ штатного привода, обобщенно предоставленные на функциональных схемах рис. 1, 2.

Функционально необходимыми элементами силовой следящей системы (рис. 4) являются: сельсинный измерительный элемент (СИЭ), фазочувствительный выпрямитель, усилитель постоянного тока, электромашинный усилитель, двигатель постоянного тока (ДПТ) и понижающий редуктор. Задающим воздействием $x(t)$ для ССС является угол поворота вала сельсиндатчика СИЭ, выходной переменной $y(t)$ – угол поворота антенной системы.

Для определения переменных параметров двигателя и усилителя мощности получим их передаточные функции. В отличие от широко распространенного подхода к получению передаточных функций по уравнениям этих элементов используем структурные представления, наглядно отражающие принципы действия. Структурные представления методически упрощают (снижают вероятность ошибки) и делают наглядным получение итоговой передаточной функции.

Рассмотрим динамические свойства двигателя постоянного тока, построив структурную схему двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [1]. Получим передаточную функцию соединения с обратной связью

$$K(P) = \frac{F_d}{J_n P(1+T_3 P)} = \frac{P(p)}{Q(p)}, \quad (1)$$

где K – коэффициент преобразования усилительного звена; J – момент инерции нагрузки; F_d – жесткость двигателя; T_3 – постоянная времени; Q – передаточное число понижающего редуктора.

Передаточная функция соединения с обратной связью имеет вид

$$K_{oc}(p) = \frac{P(p)}{D(p)} = \frac{F_d}{F_d + J_n P(1+T_3 P)} = \frac{F_d}{F_d + J_n P + J_n T_3 P^2},$$

или, разделив числитель и знаменатель на жесткость двигателя F_d , имеем

$$K_{oc}(P) = \frac{1}{1+T_M P + T_M T_3 P^2}, \quad (2)$$

где T_M – механическая постоянная времени ДНВ, характеризующая нарастание скорости и определяющаяся механическими параметрами двигателя,

$$T_M = \frac{J_n}{F_d}. \quad (3)$$

С учетом обратной связи (2) структурная схема двигателя постоянного тока имеет вид рис. 5 по углу поворота и определяется по формуле

$$K(P) = \frac{K_d}{P(1+T_M P + T_M T_3 P^2)}, \quad (4)$$

где K_d – коэффициент преобразования двигателя постоянного тока.

По динамическим свойствам двигатель постоянного тока по отношению к углу поворота вала является соединением усилительного, интегри-

рующего и колебательного звеньев. Как правило, в силовых следящих системах $T_M > T_3$, следовательно, можно записать передаточную функцию (4) в виде

$$K(P) = \frac{K_d}{P(1 + T_M P)} \quad (5)$$

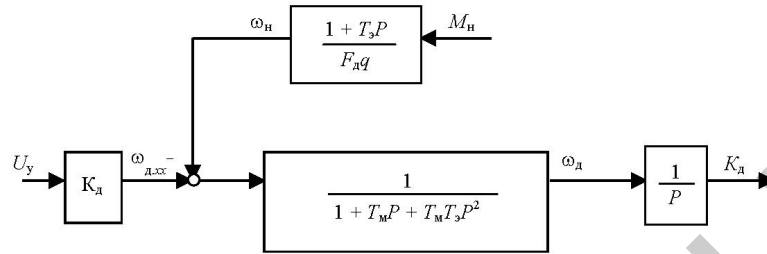


Рис. 5. Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

При малых нагрузках передаточную функцию ДНВ можно представить в виде усилительного и интегрирующего звеньев с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{K_d}{P} \quad (6)$$

Таким образом, по динамическим свойствам двигатель постоянного тока по отношению к углу поворота вала является интегрирующим звеном. Инерционные свойства двигателя описываются аperiodическим звеном.

Рассмотрим структурную математическую модель электромашинного усилителя. Для получения передаточной функции ЭМУ с использованием структурного представления (без уравнения) рассмотрим принцип действия по отдельным каскадам усиления.

Электромашинный усилитель предназначен для усиления напряжения, пропорционального сигналу рассогласования по мощности (току). Конструктивно ЭМУ выполнен как электрическая машина. Рассмотрим двухкаскадный ЭМУ. Первый каскад усиления основан на преобразовании механической энергии в электрическую, второй – на использовании энергии источника питания. Функциональная схема ЭМУ представлена на рис. 6.

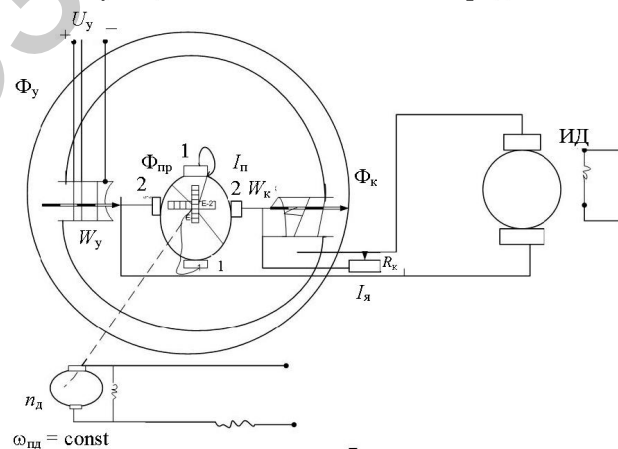


Рис. 6. Функциональная схема электромашинного усилителя

Механическая энергия приводного двигателя (ПД) трансформируется в электрическую за счет вращения якоря ЭМУ, закрепленного на роторе (вале) приводного двигателя. Второй каскад усиления – короткозамкнутый виток. Обмотка возбуждения с числом витков W_y в ЭМУ служит обмоткой управления, к которой подводится входной сигнал U_y . Этот управляющий сигнал возбуждает магнитный поток Φ_y . Двухкаскадный ЭМУ – это генератор постоянного тока с двумя парами щеток на коллекторе. За счет вращения якоря ЭМУ в магнитном потоке Φ_y на щетках 1–1 поперечной цепи наводится ЭДС. Чем больше скорость приводного двигателя $\omega_{пд}$, тем больше ЭДС в поперечной цепи E_n . Щетки 1–1 как искусственно созданный источник питания замкнуты короткозамкнутым витком. Вследствие этого в поперечной цепи возникает достаточно большой ток I_n , за счет которого появляется магнитный поток Φ_n , перпендикулярный магнитному потоку цепи управления Φ_y . За счет вращения якоря ЭМУ на щетках продольной цепи 2–2 наводится ЭДС.

Продольная цепь ЭМУ как выходная нагружена на замкнутую якорную цепь исполнительного двигателя (ИД), вследствие чего по продольной цепи потечет ток I_y и возникает поток реакции якоря $\Phi_{пр}$, действующий навстречу потоку управления. Поток $\Phi_{пр}$ будет искажать Φ_y . Для устранения вредного влияния продольного потока в ЭМУ предусматривается компенсационная обмотка W_k , соединенная последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой в цепь щеток 2–2. Компенсационную обмотку включают таким образом, чтобы протекающий по ней ток нагрузки создавал компенсационный поток Φ_k , направленный против потока $\Phi_{пр}$. Когда поток Φ_k равен потоку $\Phi_{пр}$, ЭМУ работает в режиме полной компенсации. Если $\Phi_k < \Phi_{пр}$ или $\Phi_k > \Phi_{пр}$, то усилитель работает соответственно в режиме недокомпенсации или перекомпенсации. Для регулировки ЭМУ и установления необходимого значения потока Φ_k компенсационная обмотка шунтируется переменным сопротивлением R_k .

Основными характеристиками ЭМУ являются статическая характеристика холостого хода и внешняя характеристика. Характеристика холостого хода определяет зависимость выходной ЭДС ЭМУ от величины тока управления T_y в установившемся режиме и является линейной функцией при условии, что магнитная система ЭМУ не насыщена. В реальных ЭМУ эта характеристика имеет вид узкой петли гистерезиса. Нелинейность в области больших токов объясняется насыщением магнитопровода. Для исключения влияния насыщения необходимо выбирать рабочую зону по напряжению на линейном участке характеристики.

Внешняя характеристика определяет функциональную зависимость выходного напряжения от тока нагрузки при постоянном токе управления в установившемся режиме. Выходное напряжение ЭМУ зависит от степени компенсации продольного потока

$$U_{\text{вых}} = E - I_y R_{пр} - \gamma I_y, \quad (7)$$

где E – выходная ЭДС ЭМУ; $I_{я}$ – выходной ток ЭМУ; $R_{пр}$ – сопротивление обмотки ЭМУ по продольной оси; γ – коэффициент компенсации.

Обозначим постоянные времени цепи управления и поперечной цепи через:

$$T_y = \frac{L}{R_y}; \quad T_{п} = \frac{L_n}{R_n}, \quad (8)$$

где L_y (L_n) и R_y (R_n) – индуктивные и активные сопротивления цепи управления (поперечной цепи) соответственно.

Наличие постоянных времени характеризует инерционные свойства этих обмоток. Структурная схема ЭМУ представлена на рис. 7.

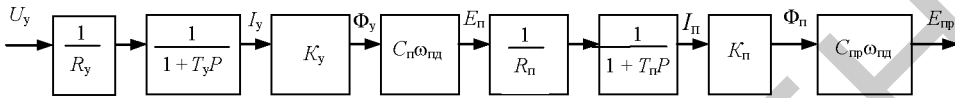


Рис. 7. Структурная схема электромашинного усилителя

Определим динамические свойства ЭМУ по структурной схеме (рис. 7), записав его передаточную функцию:

$$K_{ЭМУ}(P) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(P)}{U_y(P)} = \frac{K_y K_n C_{п} C_{пр} \omega_{пд}^2}{R_y R_n (1+T_{yp})(1+T_{пр})},$$

или

$$K_{ЭМУ}(P) = \frac{K_{ЭМУ}}{(1+T_{yp})(1+T_{пр})}, \quad (9)$$

где $K_{ЭМУ}$ – коэффициент преобразования ЭМУ;

$$K_{ЭМУ} = \frac{K_y K_n C_{п} C_{пр} \omega_{пд}^2}{R_y R_n}. \quad (10)$$

По динамическим свойствам электромашинный усилитель является последовательным соединением усилительного и двух апериодических звеньев. ЭМУ является элементом с переменными параметрами: за счет изменения скорости приводного двигателя резко изменяется коэффициент преобразования $K_{ЭМУ}$. По этой причине силовая следящая система становится нестационарной как система с переменными параметрами. Это требует конструктивных мер по стабилизации параметров системы. По статическим свойствам вследствие наличия магнитопровода ЭМУ является нелинейным звеном и аппроксимируется нелинейным звеном типа «ограничение». Обычно $T_y < T_{п}$, поэтому передаточную функцию ЭМУ можно записать

$$K_{ЭМУ}(P) = \frac{K_{ЭМУ}}{1+T_{ЭМУ}P}. \quad (11)$$

К достоинствам электромашинного усилителя следует отнести высокий коэффициент преобразования и надежность. Недостатками СМУ являются зависимость коэффициента преобразования от скорости вращения приводного двигателя, высокий уровень шума, большой вес и габариты. В силовых следящих системах, как правило, используются двухкаскадные ЭМУ по причине надежности и функционирования в различных климатических условиях, а также достижения требуемого усиления по мощности в сотни тысяч раз.

ВЫВОДЫ

Свойство робастности определяет чувствительность качества привода к неизмеримым отклонениям его параметров и характеристик возмущающих воздействий.

Качество привода определяется величиной сигнала рассогласования, если привод построен как замкнутая следящая система с единичной отрицательной обратной связью. При проектировании привода стремятся надевать его требуемой робастностью.

Определенно нестабильными параметрами привода являются функционально необходимые элементы. К ним относятся: коэффициент преобразования усилителя мощности, а также момент инерции нагрузки – объект управления при слежении по углу места (при перемещении объекта слежения в вертикальные плоскости). Отклонение этих параметров не контролируется и не измеряется в процессе работы привода. Показано, что параметрические отклонения могут быть стационарными или нестационарными, т. е. изменяющимися с течением времени. Изменения коэффициента преобразования усилителя мощности приводят к изменению коэффициента преобразования прямой цепи привода. Вследствие этого изменяется точность сложения (динамическая ошибка и ошибка по возмущению). Эти изменения точности слежения являются недопустимыми при требовании к ошибкам сложения – единицы угловых минут. Изменение момента инерции нагрузки приводит к изменению механической постоянной времени двигателя привода. В результате изменяется постоянная времени апериодического звена передаточной функции прямой цепи привода. Это влияет на качество переходного режима работы привода (затягиваются переходные процессы), а также изменяется ошибка слежения в установившемся режиме работы. Таким образом, влияние изменения момента инерции нагрузки антенного поста на качество слежения привода также нежелательно.

Показано, что в штатном приводе для обеспечения робастности по коэффициенту преобразования предусмотрена локальная обратная связь по скорости, которая охватывает исполнимые элементы привода. Степень робастности определяется «глубиной» этой обратной связи.

В структуре штатного привода робастность носит частный характер только по отношению к коэффициенту преобразования прямой цепи. Следовательно, актуальной является задача робастизации привода по отношению к другим изменяющимся параметрам и характеристикам возмущений, в том числе нестационарного характера. Робастный привод преобразует управление в системе автоматического слежения за угловыми координата-