Работа выполнена кандидатом ф.-м. наук, доц. Н. П. Власовым на кафедре электрических машин и аппаратов Горьковского политехнического института им. А. А. Жданова.

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

На правах рукописи

Н. П. ВЛАСОВ

Теория следящих систем, работающих на переменном токе

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени доктора
технических наук

г. Горький,
1961 г.

Диссертация состоит из введения и двух частей.

Во введении устанавливаются особенности следящих систем, работающих на переменном токе. В таких системах в начале контура регулирования в особом устройстве — модуляторе — сигнал, представляющий собою разность или некоторую функцию разности между входной и выходной величинами, модулирует амплитуду электрического напряжения или тока несущей частоты. Полученное в результате этого амплитудно-модулированное колебание, пройдя вдоль контура регулирования, поступает в фазовый детектор, в котором из модулированного колебания выделяется модулирующая функция. В следящих системах фазовым детектором является электродвигатель переменного тока.

Кроме систем, работающих на переменном токе, существуют смешанные следящие системы, в которых часть контура регулирования работает на переменном токе и часть — на постоянном.

В системах, работающих на переменном токе и смешанных, наряду с элементами измерительными, суммирующими и корректирующими имеются всегда специфические для таких систем элементы: модуляторы и фазовые детекторы. Основной задачей теории следящих систем, работающих на переменном токе, является нахождение передаточной функции для модулирующего колебания. Впервые эту задачу пытался решить Сабжик, который рассмотрел следящую систему с двухфазным асинхронным двигателем при входном сигнале в виде $\cos \omega t$ [15—17]. Для этой следящей системы и такого сигнала Сабжик получил комплексную передаточную функцию, но задача получения передаточной функции для сигнала в общем виде не была решена.

Е. И. Чернов [11] рассмотрел следящую систему с однофазным коллекторным двигателем с управлением со стороны обмотки возбуждения при единичной входной функции. Используя для решения уравнения в изображениях Лапласа бесконечный ряд и доказав его сходимость, Е. И. Чернов получил передаточную функцию при указанном входном сигнале. Предложенный им метод оказался очень сложным и не получил дальнейшего развития.

В работах многих авторов рассматриваются отдельные элементы, входящие в следящие системы переменного тока, главным образом стабилизирующие устройства и двигатели. Следует заметить, что некоторые авторы ошибочно считают, что получение передаточной функции для модулирующего колебания (эквивалентной передаточной функции) для каждого отдельного элемента контура регулирования дает возможность получить передаточную функцию всего устройства в соответствии со структурной схемой. Как показал автор диссертации, в общем случае этого делать нельзя: при наличии модулятора в начале устройства и фазового детектора в конце необходимо искать передаточную функцию всего устройства в целом.

Теория следящих систем, работающих на переменном токе, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, разработана автором диссертации [1—9]. Предложен относительно простой математический метод, который позволяет найти изображение Лапласа функции на выходе устройства с учетом начальных условий, а также получить передаточную функцию системы. Установлены ограничения, которые должны быть наложены на передаточную функцию устройства в том случае, если она используется для расчета переходных процессов. Указаны методы упрощения полученных передаточных функций. Получены передаточные функции следящих систем при уходе несущей частоты питающего систему генератора. Рассмотрены системы, у которых сигнал зависит от ошибки и от производной от ошибки, а также системы, у которых колебание несущей частоты представляет собою периодическую функцию времени. Предложенным методом легко получаются результаты других авторов и вскрываются допущенные ими ошибки.

В диссертации использован для исследования следящих систем частотный метод, но следящие системы переменного тока, для которых найдена функция на выходе и передаточная функция, могут быть исследованы и другими методами — например, к ним могут быть применены интегральные методы, методы распределения корней и т. д. Большой интерес представляет исследование смешанных систем, в частности, систем с асинхронными двигателями, питание которых осуществляется через магнитный усилитель: предложенным методом могут быть получены передаточные функции как таких, так и других смешанных систем. Становится возможным исследование систем переменного тока при помощи статистических методов.

В диссертации рассмотрены следящие системы, но, очевидно, предложенным методом возможно изучение других систем автоматического регулирования переменного тока.

Наконец, этот метод может быть использован для исследования некоторых радиотехнических схем.

Первая часть диссертации состоит из двух глав. В первой главе рассмотрен пассивный линейный четырехполюсник в контуре регулирования переменного тока.

Важным вопросом теории систем, работающих на переменном токе, является вопрос о том, что происходит с модулирующей функцией, когда модулированное колебание проходит через линейный пассивный четырехполюсник, передаточная функция которого известна. В диссертации показано, что если наложить на спектр модулирующей функции ограничение:

$$\omega \ll \omega_0, \tag{1}$$

где ω — высшая частота в спектре модулирующей функции, которая должна быть принята во внимание, а ω_0 — несущая частота, то, осуществляя преобразование передаточной функции при помощи операции

$$p' = \frac{\omega_0}{2}\left(\frac{\omega_0}{p} + \frac{p}{\omega_0}\right), \tag{2}$$

в которой p — оператор передаточной функции четырехполюсника, а p' — оператор передаточной функции модулирующего колебания, мы можем тем самым установить, что происходит с модулирующей функцией, когда модулированное колебание проходит через четырехполюсник.

Операция (2) позволяет всякому четырехполюснику, работающему в контуре нулевой частоты, осуществленному при помощи r, L, C элементов, сопоставить эквивалентный ему по действию на модулирующую функцию четырехполюсник, работающий на несущей частоте ω_0. Из преобразования (2) следует, что для этого необходимо заменить индуктивности последовательными резонансными контурами, емкости — параллельными резонансными контурами, составленными из идеальных элементов L и C и оставить неизменными активные сопротивления. Таким образом, всякий пассивный контур нулевой частоты, составленный из r, L, C элементов, может быть имитирован эквивалентным контуром на несущей частоте.

Назовем эквивалентной передаточной функцией четырехполюсника, работающего на несущей частоте, функцию, которая получается при замене оператора p в передаточной функции оператором p' при помощи формулы преобразования (2).

Улучшение качества систем, работающих на переменном токе, требует введения в контур четырехполюсников, которые выполняли бы операцию дифференцирования над модулирующей функцией. Передаточная функция такого четырехполюсника, записанная для оператора p, имеет вид:

$$\overline{Y(p)} = \frac{p^2 + \kappa_1 \omega_0 p + \omega_0^2}{p^2 + \kappa_2 \omega_0 p + \omega_0^2}$$

и для оператора $s = \frac{p}{\omega_0}$

$$\overline{Y(s)} = \frac{s^2 + \kappa_1 s + 1}{s^2 + \kappa_2 s + 1}. \qquad (3)$$

Операция (2) и вытекающие из нее следствия позволяют реализовать дифференцирующие четырехполюсники в виде: 1) двойного Т-образного четырехполюсника; 2) простого Т-образного (мостового) четырехполюсника; 3) дифференцирующего четырехполюсника с обратной связью; 4) дифференцирующего четырехполюсника с делителем напряжения.

В диссертации рассмотрены дифференцирующие четырехполюсники, установлены зависимости, которые существуют между коэффициентами κ_1 и κ_2, характеризующими четырехполюсник с передаточной функцией (3), и постоянными времени контуров, составляющих четырехполюсник, и даны оценки различных схем со стороны их входных и выходных сопротивлений.

Во второй главе рассмотрены устройства, которые всегда встречаются в системах, работающих на переменном токе и смешанных,—модуляторы и фазовые детекторы.

В диссертации введено понятие идеального модулятора как элемента, который выполняет перемножение модулирующей функции и колебания несущей частоты; введено понятие идеального фазового детектора, выполняющего перемножение модулированного колебания и колебания несущей частоты. Показано, что при наличии на выходе фильтра низких частот фазовый детектор выделяет, при помощи такой операции, модулирующую функцию.

Рассмотрены схемы реальных модуляторов на диодах и триодах и найдены их выходные функции для малых сигналов при помощи разложения в тригонометрические ряды. Кратко рассмотрен модулятор на многосеточных лампах и модулятор на магнитных элементах.

В теории следящих систем переменного тока большое значение имеют электромеханические модуляторы. Из них в диссертации рассмотрен сельсинный модулятор. Показано, что на выходе этого модулятора при некоторых упрощающих предположениях имеет место выходная функция:

$$u_{вых}(t) = U_m \left[x(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{\omega_0} \frac{dx}{dt} \sin(\omega_0 t + \varphi) \right]. \qquad (4)$$

Из скоростных электромеханических модуляторов, на выходе которых имеет место колебание несущей частоты, модулированное угловой скоростью, рассмотрен асинхронный тахогенератор, на выходе которого имеет место напряжение:

$$u_{вых}(t) = \frac{U_m}{\omega_0} \frac{dx}{dt} \cos(\omega_0 t + \varphi). \qquad (5)$$

Кратко рассмотрен тахогенератор в виде однофазного коллекторного электродвигателя.

В смешанных системах часто используются фазовые детекторы на электронных лампах. В диссертации рассмотрены фазовые детекторы на диодах и триодах с различными контурами в цепи нагрузки. Показано, что фазовый детектор с активным сопротивлением в цепи нагрузки может рассматриваться как последовательное соединение идеального фазового детектора, выделяющего модулирующую функцию $x(t)$, и импульсного звена с амплитудно-импульсной модуляцией. Следящая система, в которую включен фазовый детектор, разделяется, по крайней мере, на две части: часть от модулятора до фазового детектора, работающую на переменном токе, и часть между фазовым детектором и выходом, представляющую собой импульсную систему. Во второй части диссертации показано, что для части системы, работающей на переменнем токе, может быть получена передаточная функция, аналогичная той, которая имеет место для непрерывных систем, работающих на нулевой частоте. Если спектр сигнала заключен в интервале

$$0 < \omega < \omega_0 - \omega_c, \qquad (6)$$

где ω – частота в спектре сигнала, ω_0—несущая, а ω_c — частота среза амплитудно-частотной характеристики непрерывной части спектра, то импульсная система может рассматриваться как система непрерывного регулирования [10].

В диссертации рассмотрен фазовый детектор на диодах с rC контуром в цепи нагрузки [3]. Показано, что система с таким фазовым детектором для расчета переходных процессов может быть сведена к импульсной системе с прямоугольными импульсами, эквивалентными синусоидальным. Эквивалентность импульсов определяется для одинакового среднего напряжения на выходе в установившемся режиме. Аналогичным путем рассмотрен фазовый детектор на диодах с r, L, C контуром в цепи нагрузки и фазовые детекторы на триодах. Во всех этих случаях, при выполнении условия (6), система автоматического регулирования может рассматриваться как непрерывная, при невыполнении условия (6) — как импульсная.

Другим методом (разложением функций тока через лампу в степенные ряды) рассмотрен фазовый детектор на многосеточных лампах (на тетродах), для которого определена передаточная функция в случае, когда нагрузка представляет собою r, L, C контур.

Для следящих систем, работающих на переменном токе, большое значение имеют электромеханические фазовые детекторы. Электромеханическим фазовым детектором является сельсинная схема для передачи механического момента.

В диссертации показано, что электромеханическими фазовыми детекторами являются однофазный коллекторный двигатель и, имеющий очень большое значение для следящих систем переменного тока, двухфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Однофазный коллекторный двигатель в качестве фазового детектора в следящих системах может быть использован в схеме, где на управляющее напряжение включен якорь двигателя, и в схеме, в которой управляющее напряжение включено на обмотку возбуждения.

Двухфазный асинхронный двигатель имеет на статоре обмотку возбуждения, включенную на напряжение постоянной амплитуды. Обычно активное сопротивление этого контура мало по сравнению с индуктивным. Обмотка управления на статоре может питаться от усилителя мощности с относительно малым активным сопротивлением (питание от генератора напряжения). Обмотка управления может питаться от усилителя мощности с большим активным сопротивлением. Такая схема может быть рассмотрена в предположении, что индуктивное сопротивление обмотки управления мало по сравнению с активным сопротивлением контура. Для обеих схем включения асинхронного двигателя получены уравнения движения, которые использованы во второй части диссертации.

Во второй части диссертации, содержащей пять глав, начиная с третьей, излагается теория следящих систем переменного тока, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, разработанная автором диссертации.

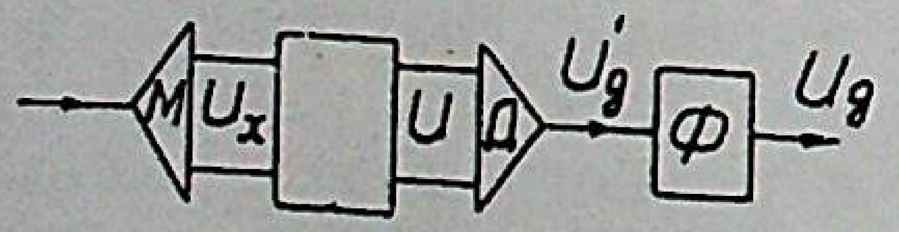

Рис. 1.

В третьей главе рассматривается линейный пассивный четырехполюсник с передаточной функцией $\overline{Y(p)}$, включенный между идеальным модулятором $М$ и идеальным фазовым детектором $Д$ с фильтром низких частот $Ф$ (рис. 1). Показано, что такое устройство описывается системой линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами. Записывая систему

уравнений в изображениях Лапласа и решая ее, получим для изображения функции на выходе системы выражение:

$$\overline{U_д'(p)} = \frac{1}{4}\left[\overline{Y(p-j\omega_0)}\,e^{j(\psi-\varphi)} + \overline{Y(p+j\omega_0)}\,e^{-j(\psi-\varphi)}\right]\overline{X(p)} +$$

$$+ \frac{1}{4}\left[\overline{Y(p-j\omega_0)}\,\overline{X(p-j2\omega_0)}\,e^{j(\psi+\varphi)} + \right.$$

$$\left. + \overline{Y(p+j\omega_0)}\,\overline{X(p+j2\omega_0)}\,e^{-j(\psi+\varphi)}\right].$$

Здесь $\overline{X(p)}$ — изображение сигнала (модулирующей функции), φ и ψ — начальные фазы колебания несущей частоты ω_0, подаваемого на модулятор и фазовый детектор. Пусть передаточная функция четырехполюсника может быть записана в следующем виде:

$$\overline{Y(p)} = \frac{\overline{F_1(p)}}{\overline{F_2(p)}},$$

где $\overline{F_1(p)}$ и $\overline{F_2(p)}$ — полиномы оператора p.

Наложим на $\overline{F_1(p)}$ и $\overline{F_2(p)}$ ограничения:

1) степень полинома $\overline{F_2(p)}$ не ниже степени полинома $\overline{F_1(p)}$;

2) полиномы $\overline{F_1(p)}$ и $\overline{F_2(p)}$ не имеют одинаковых корней.

Пусть среди корней полинома $\overline{F_2(p)}$ нет комплексно сопряженных корней вида $p_k = \delta_k \pm j\omega_k$, частоты которых ω_k были бы близки к несущей; в спектре сигнала $x(t)$ существенные гармоники имеют частоты ω_l, удовлетворяющие неравенству $\omega_l \ll \omega_0$; фазовый детектор имеет фильтр низких частот (или сам является таковым). В диссертации показано, что в этом случае колебания, соответствующие изображениям $\overline{X(p \pm j2\omega_0)}$, не будут пропущены на выход. Отбрасывая соответствующие члены, получим для передаточной цепочки (рис. 1):

$$\overline{Y_д(p)} = \frac{1}{4}\left[\overline{Y(p-j\omega_0)}\,e^{j(\psi-\varphi)} + \overline{Y(p+j\omega_0)}\,e^{-j(\psi-\varphi)}\right]. \qquad (7)$$

Переходя к аргументу $s = \frac{p}{\omega_0}$ и вводя $\psi - \varphi = \delta$, получим

$$\overline{Y_д(s)} = \frac{1}{4}\left[\overline{Y(s-j)}\,e^{j\delta} + \overline{Y(s+j)}\,e^{-j\delta}\right];$$

Корни полинома $\overline{F_2(p)}$ могут быть определены по методу Н. И. Лобачевского.

Область, в которой не должно быть корней полинома

$\overline{F_2(p)}$, ограничивается на комплексной полуплоскости операратора $p = x + jy$ $(y > 0)$ осью мнимых величин $x = 0$, прямыми $y = \omega_0(1 \pm \Delta)$ $(0 < \Delta < 1)$, параллельными оси действительных величин, и прямой $x = \delta_{кр}$, параллельной оси мнимых величин. Здесь $\delta_{кр}$ должно быть таким, чтобы при наличии корней вида $p_к = \delta_к \pm j\omega_к$, где $(1-\Delta)\omega_0 < \omega_к < (1+\Delta)\omega_0$ выполнялось неравенство $|\delta_к| > |\delta_{кр}|$. При достаточно большом по абсолютной величине $|\delta_{кр}|$ колебательные составляющие, соответствующие корням $p_к = \delta_к \pm j\omega_к$, окажут влияние только на начало переходного процесса на малом промежутке времени и этим влиянием можно пренебречь.

Зная эту область и функцию $\overline{W(p)} = \dfrac{1}{\overline{F_2(p)}}$, можно, используя теорему Коши, определить находятся ли корни полинома $\overline{F_2(p)}$ в указанной области.

Из теории могут быть сделаны следующие выводы:

1. Пусть имеется четырехполюсник с передаточной функцией $\overline{Y(p)}$. Пусть при помощи операции (2) может быть найдена эквивалентная передаточная функция $\overline{Y'(p')}$. Очевидно, в общем случае $\overline{Y'(p')} \neq \overline{Y_д(p)}$.

2. Пусть имеются четырехполюсники направленного действия с передаточными функциями $\overline{Y_1(p)}$, $\overline{Y_2(p)}$ и т. д., образующие некоторую схему, включенную между идеальными модулятором и фазовым детектором. Пусть для каждого четырехполюсника может быть получена при помощи операции (2) эквивалентная передаточная функция. Передаточную функцию всего устройства для модулирующего колебания нельзя находить, пользуясь эквивалентными передаточными функциями четырехполюсников и структурной схемой. Передаточная функция всего устройства (включая модулятор и фазовый детектор) может быть найдена по формуле (7), в которой $\overline{Y(p)}$ должна быть определена из передаточных функций отдельных четырехполюсников в соответствии со структурной схемой.

Передаточная функция (7) цепочки звеньев (рис. 1) зависит от частоты генератора переменного тока, питающего устройство. Пусть четырехполюсник рассчитан на работу при некоторой определенной несущей частоте ω_0, а генератор, питающий модулятор и фазовый детектор, имеет частоту $\omega_н$. Для передаточной функции цепочки звеньев (рис. 1) получим:

$$\overline{Y_д(p)} = \frac{1}{4}\{[\overline{Y(p - j\omega_н)}\, e^{j(\psi - \varphi)}] + [\ ]^*\}. \qquad (8)$$

Здесь, и в дальнейшем, слагаемое в фигурных скобках, взятое в квадратные скобки со звездочкой — [ ]*, представляет собою выражение, комплексно-сопряженное предыдущему слагаемому, взятому в квадратные скобки — [ ].

Вводя параметр $\lambda = \dfrac{\omega_н}{\omega_0}$ и оператор $s = \dfrac{p}{\omega_0}$, запишем:

$$\overline{Y_д(s)} = \frac{1}{4}\{[\overline{Y(s - j\lambda)}\, e^{j(\psi - \varphi)}] + [\ ]^*\}. \qquad (9)$$

Обычно λ близко к 1.

Формулы (8) и (9) позволяют установить как меняется передаточная функция при уходе несущей частоты генератора.

В диссертации получено выражение передаточной функции для случая, когда на модулятор и фазовый детектор поступают в качестве опорного напряжения периодические, но не синусоидальные колебания. Показано, что в образовании передаточной функции принимают участие все гармоники, которые одновременно встречаются в обоих опорных напряжениях.

Получено выражение передаточной функции в том случае, если на выходе модулятора имеет место сигнал, зависящий от ошибки и от скорости изменения ошибки (4).

В диссертации рассмотрен случай, когда между модулятором и фазовым детектором включен дифференцирующий четырехполюсник с передаточной функцией (3). Показано, что передаточная функция в этом случае может быть записана в следующем виде:

$$\overline{Y_д(s)} = \frac{\overline{A(s)}\cos\delta + (\kappa_2 - \kappa_1)\, s^2 \sin\delta}{2\overline{B(s)}}, \qquad (10)$$

где

$$\overline{A(s)} = s^2(s^2 + 4) + (\kappa_1 + \kappa_2)\, s\,(s^2 + 2) + \kappa_1\kappa_2(s^2 + 1),$$

$$\overline{B(s)} = s^2(s^2 + 4) + 2\kappa_2\, s\,(s^2 + 2) + \kappa_2^2(s^2 + 1)$$

и $\quad \delta = \psi - \varphi.$

Полагая $\delta = 0$ и используя неравенство $|s^2| \ll 1$, получим:

$$\overline{Y_д(s)} = \frac{2s + \kappa_1}{2(2s + \kappa_2)}. \qquad (11)$$

Если к передаточной функции (3) применить формулу преобразования (2), то передаточная функция для модулирующего колебания примет вид:

$$\overline{Y'(s')} = \frac{2s' + \kappa_1}{2s' + \kappa^2}. \qquad (12)$$

Выражения (11) и (12), полученные различными методами, совпадают с точностью до множителя $\frac{1}{2}$, который появляется в формуле (11) вследствие наличия в схеме модулятора и фазового детектора.

В диссертации по формуле (10) для случая $\delta = 0$ и по формуле (11) построены амплитудно-фазовые, амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики для четырехполюсников с различными значениями коэффициентов κ_1 и κ_2. Кроме того, в диссертации рассмотрен интегрирующий четырехполюсник в контуре регулирования переменного тока [4] и, кратко, фильтры высоких и низких частот.

В четвертой главе диссертации изучены следящие системы, в которых фазовым детектором является однофазный коллекторный двигатель с управлением со стороны якоря.

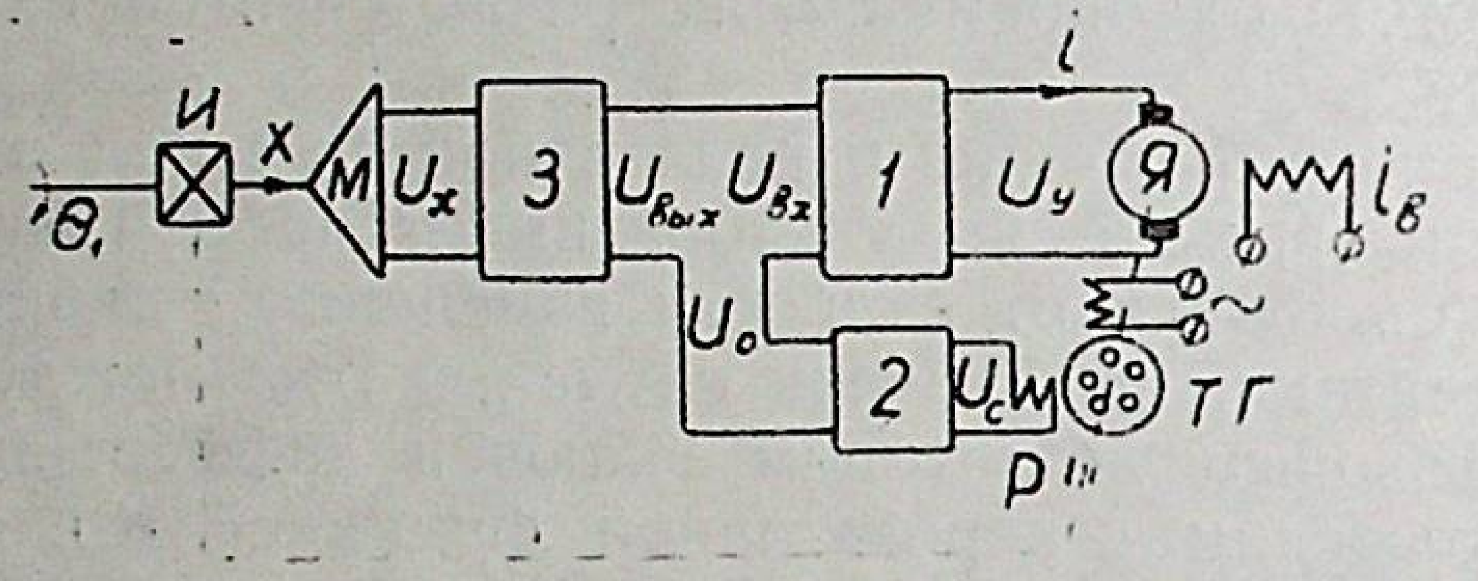

Рис. 2.

Рассмотрена следящая система, схема которой приведена на рис. 2. В этой схеме *И*—измерительный элемент, *М* — модулятор, *1, 2, 3* — линейные пассивные четырехполюсники с передаточными функциями $\overline{Y_1(p)}$, $\overline{Y_2(p)}$, $\overline{Y_3(p)}$, *Я* — якорь электродвигателя, *Т. Г.* — тахогенератор. Показано, что при некоторых упрощающих предположениях такая следящая система описывается линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Применяя к этим уравнениям преобразование Лапласа, решая полученную систему уравнений в изображениях относительно изображения функции на выходе $\overline{\Theta_2(p)}$, отбрасывая члены, содержащие изображение сигнала X и функции на выходе Θ_2 с аргументами $p \pm j2\omega_0$, соответствующие колебаниям, модулированным двойной несущей частотой, получим изображение Лапласа для функции на выходе.

Передаточная функция, записанная для оператора $s = \frac{p}{\omega_0}$, имеет вид:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}} = \frac{\frac{1}{2}\{[\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}\,e^{j\delta}] + [\;]^*\}}{T_\kappa s\{\kappa_m(T_m s+1)\overline{F(s)}\,\overline{F^*(s)} + T_a s + 1 + \frac{K_c}{2}[\overline{H(s)} + \overline{H^*(s)}]\}}.$$

Здесь: $\overline{F(s)} = 1 + T_a(s-j)$.

$$\overline{H(s)} = \overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_2(s-j)}\,|1+T_a(s+j)|\,e^{j\gamma}.$$

Величины T_κ, K_m, T_m, T_a и K_c представляют собою безразмерные коэффициенты, δ — сдвиг фаз между колебаниями несущей частоты, поданными на фазовый детектор и модулятор, γ — сдвиг фаз между колебаниями, поданными на модулятор и на четырехполюсник *2* в цепи обратной связи.

Получена передаточная функция замкнутой системы $\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{\Theta_1(s)}}$ и выяснены условия стабилизации системы в различных случаях.

В диссертации рассмотрена стабилизация при помощи дифференцирующего четырехполюсника и при помощи отрицательной обратной связи по скорости. При заданном коэффициенте усиления системы определены коэффициенты дифференцирующего четырехполюсника. Выполнен примерный расчет переходного процесса для системы с конкретным двигателем.

При наличии в схеме дифференцирующего четырехполюсника, который является элементом, настроенным на определенную частоту, система становится чувствительной к уходу частоты питающего систему генератора. Определена передаточная функция следящей системы в этих условиях и построены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики рассчитанной выше системы при уменьшении и при увеличении частоты генератора на 10%.

В диссертации найдены передаточные функции для случая входного сигнала, зависящего от ошибки и ее производной (4) и для случая, когда колебания несущей частоты представляют собою периодические функции времени. Во

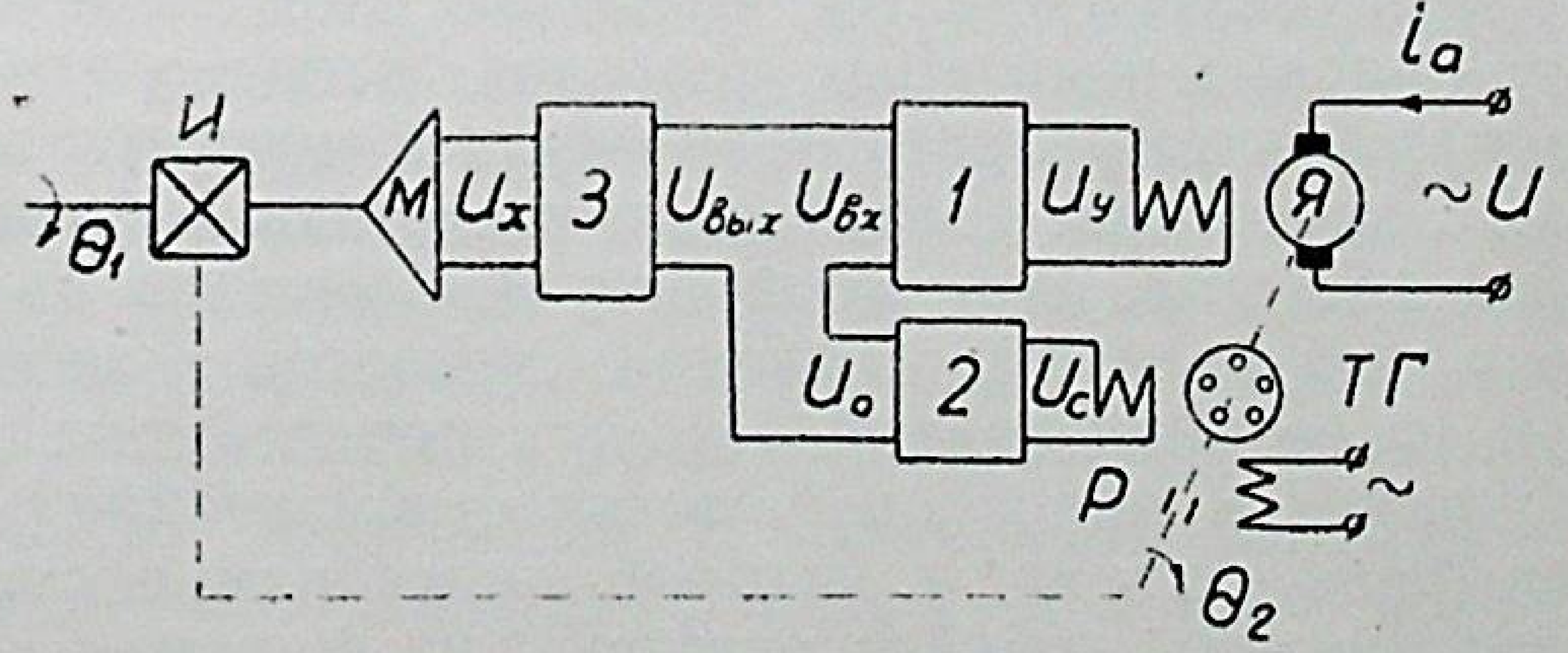

Рис. 3.

втором случае установлено, что передаточная функция зависит от тех гармоник, которые одновременно имеют место в колебаниях, подаваемых на модулятор и на фазовый детектор. Влияние гармоник может быть устранено, если на модулятор или на фазовый детектор подать синусоидальное колебание.

В пятой главе изучены следящие системы с однофазным коллекторным двигателем с управлением со стороны обмотки возбуждения. Рассмотрена система, схема которой приведена на рис. 3. Показано, что если воспользоваться некоторыми упрощениями, то система описывается линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Применяя к этим уравнениям преобразование Лапласа, решая полученную систему в изображениях относительно изображения функции на выходе, отбрасывая члены, содержащие изображение сигнала X с аргументами $p \pm j2\omega_0$, получим выражение для изображения Лапласа функции на выходе.

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}} = \frac{\frac{1}{2}\{[\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}\,\overline{F^*(s)}\,e^{j\varphi}] + [\quad]^*\}}{T_\kappa \kappa_m s\,\{(T_m s + 1)\overline{F(s)}\,\overline{F^*(s)} + \frac{1}{2}\frac{K_c}{\kappa_m}[\overline{H(s)} + \overline{H^*(s)}]\}}.$$

Легко находится передаточная функция замкнутой системы.

В диссертации показано, что систему можно стабилизировать введением обратной связи по скорости, выяснены для этого случая условия устойчивости и рассмотрен пример стабилизации системы с конкретным двигателем при заданном коэффициенте усиления.

Следящая система может быть стабилизирована введением в контур дифференцирующего четырехполюсника. В диссертации рассмотрена система, устойчивость которой достигается введением отрицательной обратной связи по скорости, а повышение качества — включением в контур дифференцирующего четырехполюсника. Для такой системы определен характер переходного процесса при единичной входной функции и при нулевых начальных условиях; найдена передаточная функция системы при уходе несущей частоты генератора, а также построены амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики при уходе несущей частоты на $\pm 10\%$.

Рассмотрена следящая система с сигналом, зависящим от ошибки и от ее производной (4), для нее найдена передаточная функция и выяснены условия стабилизации.

Рассмотрена система, у которой колебания несущей частоты представляют собой периодические функции времени; установлено, что передаточная функция определяется теми гармониками, которые одновременно подаются на модулятор и на фазовый детектор. Влияние гармоник можно устранить, если на модулятор или на фазовый детектор подать синусоидальное колебание.

В шестой главе рассмотрены следящие системы с двухфазным асинхронным двигателем, обмотка управления которого питается от генератора напряжения [5—9].

В следящих системах, работающих на переменном токе, в качестве исполнительного элемента используется главным образом двухфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Одна из обмоток статора—обмотка возбуждения—включается на генератор достаточной мощности, так что активным сопротивлением контура этой обмотки можно пренебречь по сравнению с индуктивным.

Другая обмотка—обмотка управления—может питаться от управляемого усилителя мощности с достаточно малым активным сопротивлением (питание от генератора напряжения), в этом случае также можно пренебречь активным сопротивлением контура обмотки управления. Схема следящей системы приведена на рис. 4. На этой схеме: $И$—измерительный элемент, M—модулятор, 1, 2, 3—линейные пассивные

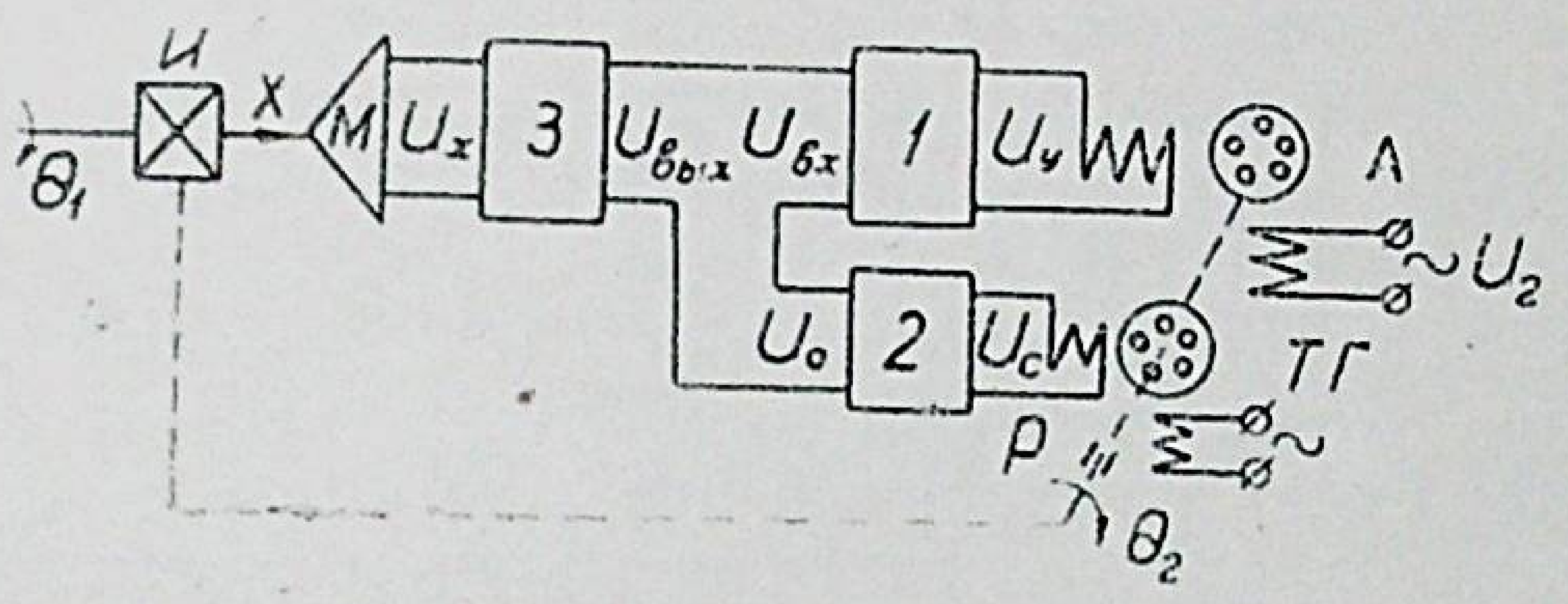

Рис. 4.

четырехполюсники с передаточными функциями $\overline{Y_1(p)}$, $\overline{Y_2(p)}$ и $\overline{Y_3(p)}$, A — двухфазный асинхронный двигатель, $Т.\ Г.$—тахогенератор, P—редуктор. Напряжение u_c в контур обратной связи снимается с тахогенератора. Оно может сниматься с мостовой схемы, включенной в контур обмотки управления. Такие схемы неоднократно рассматривались.

В схеме с тахогенератором фаза напряжения u_c может изменяться в широких пределах. При достаточно малых сигналах следящая система описывается линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Переходя в уравнениях, описывающих систему, к изображениям, решая систему уравнений в изображениях относительно $\overline{\Theta_2(p)}$, отбрасывая в полученном решении члены, содержащие изображения функций X и Θ_2 с аргументами $p \pm j2\omega_0$, получим изображение функции на выходе с учетом начальных условий.

Передаточная функция системы, записанная для оператора $s = \frac{p}{\omega_0}$, в случае, когда напряжение, снимаемое в контур обратной связи, близко по фазе с опорным напряжением обмотки возбуждения, имеет вид:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}}=\frac{\frac{1}{2}\left\{\left[\frac{s-j2}{s-j}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}e^{j\delta}\right]+[\ ]^*\right\}}{T_2 s\left\{T_1 s+1+\frac{K_c}{2}\left(\left[\frac{j(s-j2)}{s-j}\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_2(s-j)}e^{j\delta}\right]+[\ ]^*\right)\right\}}.$$

Если в контур обратной связи ввести напряжение, близкое по фазе к напряжению на обмотке управления, то для передаточной функции получим:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}}=\frac{\frac{1}{2}\left\{\left[\frac{s-j2}{s-j}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}e^{j\delta}\right]+[\ ]^*\right\}}{T_2 s\left\{T_1 s+1+\frac{K_c}{2}\left(\left[\frac{s-j2}{s-j}\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_2(s-j)}e^{j\delta}\right]+[\ ]^*\right)\right\}}.$$

Здесь T_1, T_2 — безразмерные постоянные, K_c — безразмерный коэффициент, характеризующий обратную связь.

В диссертации рассмотрена система без обратной связи ($K_c=0$). Если четырехполюсники *1* и *3* являются безынерционными, то единственным элементом с операторным коэффициентом будет асинхронный двигатель. Для передаточной функции асинхронного двигателя получим выражение:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}}=\frac{K_0\left[(s^2+2)\cos\delta+s\sin\delta\right]}{s\,(T_1 s+1)(s^2+1)}.$$

Аналогичная функция была получена Н. М. Садовским [12].

Передаточная функция еще более упростится, если положить $\delta=0$ и $|s^2|\ll 1$.

Тогда

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}}=\frac{2K_0}{s(T_1 s+1)}.$$

В таком виде передаточная функция асинхронного двигателя использована во многих работах (например, в [13]).

Передаточная функция замкнутой системы при безынерционных четырехполюсниках *1* и *3*, без стабилизирующей обратной связи ($K_c=0$) и при $\delta=0$, имеет вид:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{\Theta_1(s)}}=\frac{K_0(s^2+2)}{s(T_1 s+1)(s^2+1)+K_0(s^2+2)}.$$

Такая система неустойчива.

Для стабилизации можно воспользоваться обратной связью по скорости.

В диссертации показано, что если в цепь обратной связи ввести напряжение в фазе с напряжением обмотки управления, то система остается неустойчивой. Если же в цепь обратной связи подать напряжение в фазе с напряжением обмотки возбуждения, то система может быть стабилизирована.

Таким образом, для стабилизации обратной связью целесообразно вводить напряжение в фазе с напряжением на обмотке возбуждения.

Улучшение качества системы может быть достигнуто введением в контур управления дифференцирующего четырехполюсника. В диссертации найдены уравнения, связывающие коэффициенты, характеризующие дифференцирующий четырехполюсник, обратную связь и приведенную электромеханическую постоянную времени асинхронного двигателя T_1. В качестве примера рассмотрена стабилизация следящей системы с асинхронным двигателем АДП-262, у которого приведенная постоянная времени T_1 относительно мала ($T_1=1{,}73$). Для заданного коэффициента усиления определены коэффициенты четырехполюсника, коэффициент обратной связи и построен график переходного процесса.

В качестве второго примера рассмотрена стабилизация следящей системы с двигателем АДП-263, у которого приведенная постоянная времени $T_1=100$. Для этой системы выполнены те же расчеты, что и в предыдущем случае.

При наличии дифференцирующего четырехполюсника в контуре найдены передаточные функции следящей системы при уходе несущей частоты. Для рассчитанных систем с двигателями АДП-262 и АДП-263 построены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, получающиеся при уходе несущей на $\pm 10\%$.

Для следящей системы с сигналом, зависящим от ошибки и ее производной (4), получены передаточные функции; установлено, что в этом случае система без обратной связи, у которой единственным звеном с операторным коэффициентом является асинхронный двигатель, будет устойчива [8,14].

Рассмотрена следящая система, у которой колебания несущей частоты представляют собою периодические функции времени и определена передаточная функция такой системы.

В седьмой главе рассмотрены следящие системы с двухфазным асинхронным двигателем, обмотка управления которого питается от генератора тока. Такая идеализация может иметь место в том случае, если обмотка управления питается от усилителя мощности с большим активным сопротивлением (от генератора тока), столь большим, что индуктивным сопротивлением контура управления можно пренебречь.

При некоторых упрощениях и в предположении малости сигнала система описывается линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Переходя в этих уравнениях к изображениям, решая их относительно изображения функции на выходе $\Theta_2(p)$, отбрасывая в решении члены, в которые входят функции X и Θ_2 с аргументами $p \pm j2\omega_0$, получим изображение функции на выходе с учетом начальных условий.

Передаточная функция системы в том случае, если напряжение, вводимое в цепь обратной связи, близко по фазе с напряжением обмотки возбуждения, может быть записана следующим образом:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}} = \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{s-j2}{T(s-j)+1}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}e^{j\gamma}\right]+\right.$$
$$+[\ ]^*\Big\}\Big\{T_2 s\Big(T_1 s+1+\frac{K_c}{2}\Big(\Big[\frac{j(s-j2)}{T(s-j)+1}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_2(s-j)}e^{j\gamma}\Big]+$$
$$\left.+[\ ]^*\Big)-\frac{T_3}{2}\Big(\Big[\frac{T(s-j2)}{T(s-j)+1}\Big]+[\ ]^*\Big)\Big)\right\}^{-1}.$$

Если в цепь обратной связи ввести напряжение близкое по фазе с напряжением в контуре обмотки управления, то для передаточной функции получим выражение:

$$\frac{\overline{\Theta_2(s)}}{\overline{X(s)}} = \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{s-j2}{T(s-j)+1}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_3(s-j)}\,e^{j\gamma}\right]+\right.$$
$$+[\ ]^*\Big\}\Big\{T_2 s\Big(T_1 s+1+\frac{K_c}{2}\Big(\Big[\frac{s-j2}{T(s-j)+1}\,\overline{Y_1(s-j)}\,\overline{Y_2(s-j)}e^{j\gamma}\Big]+$$
$$\left.+[\ ]^*\Big)-\frac{T_3}{2}\Big(\Big[\frac{T(s-j2)}{T(s-j)+1}\Big]+[\ ]^*\Big)\Big)\right\}^{-1}.$$

В диссертации показано, что для случая чисто инерционной нагрузки при отсутствии обратной связи ($K_c=0$) и безынерционных четырехполюсниках *1* и *3* следящая система, в которой единственным звеном с операторным коэффициентом является асинхронный двигатель, будет неустойчива. Для стабилизации системы может быть использована обратная связь по скорости; рассмотрены условия стабилизации при введении в контур обратной связи напряжения в фазе с напряжением обмотки возбуждения и напряжения в фазе с напряжением обмотки управления; показано, что система может быть стабилизирована в обеих случаях при достаточно большом коэффициенте обратной связи.

Рассмотрена коррекция следящей системы при введении в контур управления дифференцирующего четырехполюсника, если система стабилизирована обратной связью. Получена передаточная функция и определено условие, при котором передаточная функция может рассматриваться как произведение передаточных функций дифференцирующего четырехполюсника и асинхронного двигателя с обратной связью.

Рассметрена следящая система при уходе несущей частоты. Получены передаточные функции следящей системы, у которой сигнал зависит от ошибки и ее производной и установлены условия стабилизации системы в этом случае.

Рассмотрена следящая система, у которой колебания несущей частоты представляют собою периодические функции времени; для нее получены передаточные функции при двух различных напряжениях, подаваемых в контур обратной связи.

Заключение

В диссертации разработана теория следящих систем переменного тока. Введены понятия идеального модулятора и идеального фазового детектора. Рассмотрены конкретные модулирующие и детектирующие устройства. Показано, что следящие системы, работающие на переменном токе, при некоторых идеализациях описываются линейными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами. Предложен метод, позволяющий получить изображение Лапласа функции на выходе системы с учетом начальных условий, а также передаточные функции замкнутой и разомкнутой систем. Установлены те ограничения, которые должны быть наложены на передаточную функцию, при которых могут быть отброшены в полученных формулах члены, соответствующие колебаниям, модулированным двойной несущей частотой, появляющиеся в таких системах. Получены передаточные функции систем, у которых сигнал зависит от ошибки и ее производной, а также передаточные функции систем, у которых колебания несущей частоты являются периодическими, но не синусоидальными функциями времени, и передаточные функции при уходе несущей частоты питающего систему генератора. Предложен метод упрощения передаточных функций. Исследованы дифференцирующие и интегрирующие четырехполюсники, используемые для стабилизации систем, работающих на переменном токе.

Рассмотрены следящие системы, в которых фазовым детектором является однофазный коллекторный двигатель с управлением: а) со стороны якоря, б) со стороны обмотки возбуждения. При помощи частотных методов выяснены условия стабилизации таких систем: а) при помощи отрицательной обратной связи по скорости, б) введением в контур регулирования дифференцирующего четырехполюсника.

Рассмотрены следящие системы с двухфазным асинхронным двигателем с питанием обмотки управления: а) от генератора напряжения, б) от генератора тока. Выяснены наиболее целесообразные методы получения напряжения отрицательной обратной связи для стабилизации системы. Рассмотрены примеры стабилизации следящих систем с использованием отрицательной обратной связи и введением в контур регулирования дифференцирующего четырехполюсника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Н. П. Функции передачи некоторых детектирующих устройств, используемых в следящих системах, Труды Горьковского политехнического института, т. XIII, в. 1, Горький, 1957.

2. Власов Н. П. К теории следящих систем, работающих на переменном токе, Труды Горьковского политехнического института, т. XIII, в. 3, Горький, 1957.

3. Власов Н. П. Переходные процессы в некоторых фазовых детекторах. „Известия вузов—„Электромеханика“, № 2. 1960, Новочеркасск.

4. Власов Н. П. Интегрирующий четырехполюсник в контуре регулирования переменного тока. Труды Горьковского политехнического института, т. XVI, в. 5, Горький, 1960.

5. Власов Н. П. Элементы теории следящих систем, работающих на переменном токе и систем смешанных, „Известия вузов— „Электромеханика“, № 1, 1958, Новочеркасск.

6. Власов Н. П. Метод получения передаточных функций систем автоматического регулирования, работающих на переменном токе, „Автоматика и телемеханика,“ т. XXI, в. 6, 1960.

7. Власов Н. П. Функции передачи следящих систем, работающих на переменном токе с некоторыми стабилизирующими устройствами, „Известия вузов — „Электромеханика“, № 12, 1958, Новочеркасск.

8. Власов Н. П. Следящие системы, работающие на переменном токе, в которых сигнал зависит от ошибки и ее производной, „Автоматика и телемеханика“, т. XX, в. 10, 1959.

9. Власов Н. П. Коррекция следящей системы, работающей на переменном токе; с двухфазным асинхронным двигателем, „Известия вузов, —„Электромеханика“, № 10, 1960, Новочеркасск.

10. Цыпкин Я. З. Теория импульсных систем, Физматгиз, 1959, Ленинград.

11. Чернов Е. И. Исследование маломощного сервомеханизма на переменном токе, „Автоматика и телемеханика“, т. XIII, в. 1, 1952.

12. Садовский И. М. Асинхронный электродвигатель, как элемент схемы регулирования, „Автоматика и телемеханика“, т. XIII, в. 6, 1952.

13. Фельдбаум А. А. Электрические системы автоматического регулирования, Оборонгиз, 1957.

14. Моррис Д. Теоретический и экспериментальный метод анализа огибающей модулированного сигнала, Автоматическое регулирование, Сб. материалов конференции в Кренфильде, 1951, ИЛ. 1951.

15. Sobczyk A. Journ. Francl. Ihst. 246, 21 (1948).

16. Sobczyk A. Journ. Francl. Inst. 246, 95, (1948).

17. Sobczyk A. Journ. Erancl. Inst. 246, 187 (1948).

МЦ 03657. Тип. ГПИ им. А. А. Жданова, зак. 81, тир. 200.
объём 1 1/4 п. л., 16.3.61 г.