

M239979

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

ВОЛКОВА Ирина Петровна

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ,
РАБОТАЮЩИХ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ,
С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ СИЛ ОТ СКОРОСТИ

(01.02.02 — Теория механизмов и машин и автоматических
линий)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент Мусатов А. К.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Гортинский В. В.,
кандидат технических наук, доцент Стариков И. С.

Ведущее предприятие — Государственный научно-исследовательский институт Машиноведения.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита состоится « » 1974 г.
на заседании Совета конструкторско-механического факультета МВТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Ваши отзывы и предложения прошу направлять по адресу: (заверенный печатью) МВТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 15.

Ученый секретарь: бов Л. Н.

M239979

В материалах XXIV съезда КПСС об успешном решении экономических и технических задач, стоящих в 9-ой пятилетки, важное место отведено машиностроению. Развитие автоматизированного машиностроения, в первую очередь определяется состоянием общей теории машин. Динамика машин — один из разделов общей теории, получивший особо широкое развитие начиная со второй половины 40-х годов. Динамика машин решает две группы задач. К первой группе относятся задачи динамического анализа, состоящие в разработке методов составления уравнений движения машины и способов решения этих уравнений для периодических и переходных режимов. Ко второй группе относятся задачи динамического синтеза, состоящие в разработке методов расчета размеров, масс, моментов инерции, обеспечивающих заданный закон движения.

Решение задач динамического анализа и синтеза было выполнено сначала для машинных агрегатов, у которых моменты движущих сил и сил сопротивления являются только функциями положения. Широкое внедрение электропривода в промышленности вызвало необходимость учитывать влияние и сил, зависящих от скорости. Особо резко выраженные зависимости движущего момента от скорости имеют асинхронные и шунтовые электродвигатели. Имеется целый ряд рабочих машин (вентиляторы, дымососы, центробежные насосы, электрогенераторы и др.), у которых момент сопротивления также есть функция угловой скорости.

Разработка методики динамического синтеза, осуществляемого аналитическими методами, с учетом зависимости сил от скорости, и анализ этих решений является одной из важнейших задач современной динамики машин.

Настоящая работа посвящена решению аналитическим методом задачи динамического синтеза механизмов, работающих в установленном режиме, с учетом зависимости сил от скорости и анализ полученных результатов. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения (выводы) и приложения.

В главе I дан обзор работ, в которых рассмотрено решение задач динамического анализа и синтеза как без учета зависимости сил от скорости, так и с учетом этой зависимости.

Из работ, рассматривающих решение задач динамического анализа и синтеза без учета зависимости сил от скорости, наибольший



интерес представляют работы Н.Е. Жуковского, Виттенбауэра, Н.И. Мерцалова, И.И. Артоболевского, Е.И. Гутяра, Д.М. Лукичева.

Начиная с середины 40-х годов, появляются работы, в которых учитывается влияние сил, зависящих от скорости. В большинстве этих работ решаются задачи динамического анализа, т.е. определяется закон движения. Здесь следует отметить, в первую очередь, работы И.И. Артоболевского, Вяч.А. Зиновьева, М.А. Скуридина, А.П. Бессонова, Г.Г. Баранова. С точки зрения настоящей работы наибольший интерес представляют исследования, связанные с решением задач динамического синтеза с учетом зависимости сил от скорости. В этой области были предложены, главным образом, численные, графические, графо-аналитические методы решения, которые не позволяли, однако, провести анализ решения в общем виде. Из них следует отметить графический метод, разработанный Вяч.А. Зиновьевым. Аналитический метод определения момента инерции маховика был предложен В.Ф. Рачинцом и В.Ф. Столярчуком для машин с асинхронным электродвигателем. Авторами получена формула для вычисления момента инерции маховика при аппроксимации характеристики двигателя двухчленной квадратичной параболой и синусоидальном законе изменения нагрузочного момента. Эта работа была несомненным шагом вперед; однако, в ней рассматривался только один вид нагрузочного момента и она не содержала анализа полученного результата.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы для механизмов с абсолютно жесткими звеньями, нагруженных силами, зависящими как от скорости, так и от положения, разработать методику определения необходимого момента инерции маховика. При этом необходимо установить, как проявляется влияние зависимости приложенных сил от скорости на величину необходимого момента инерции; выявить, велико ли это влияние и рассмотреть его характер при различных видах нагрузочного момента $M(\varphi)$; вскрыть физическую сущность явления; разработать инженерный метод расчета момента инерции, т.е. составить рабочую формулу, в которой необходимый момент инерции зависел бы от заданного коэффициента неравномерности, средней угловой скорости, параметров двигателя и рабочей машины; показать область, в которой существующие методы определения момента инерции, не учитывающие влияние сил от ско-

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

рости, вполне приемлемы и где они дают заметную ошибку.

Для решения поставленной задачи взято дифференциальное уравнение движения механизма. При составлении уравнения движения приняты следующие ограничения и упрощения: приведенный момент инерции считается величиной постоянной; вследствие малости изменения угловой скорости (малости коэффициента неравномерности) момент, зависящий от угловой скорости, принимается изменяющимся на участке $\omega_{max} - \omega_{min}$ по линейному закону; вследствие малости $\Delta\omega$ принято, что $\varphi \approx \omega_{\varphi} t$; периодическая нагрузка рассматривается двух видов: либо в форме разложения в ряд Фурье, либо в ступенчатой форме.

В главе II рассмотрен динамический синтез при периодическом моменте, представляемом рядом Фурье.

В связи с решаемой задачей машинные агрегаты можно разделить на два вида. В агрегатах первого вида движущий момент является функцией угловой скорости и представляется зависимостью $M_0 = A - B\omega$, а момент сопротивления есть периодическая функция угла поворота, который раскладывается в ряд Фурье. Примеры таких агрегатов: металлорежущие и ткацкие станки, прессы, компрессоры и т.д. с приводом от шунтовых, асинхронных, серийных электродвигателей. В агрегатах второго вида зависящим от скорости является момент сопротивления, а движущий момент — периодическая функция угла поворота. К таким агрегатам относятся: дымосос, вентилятор, центробежный насос и тому подобные машины с приводом от поршневого двигателя, электрогенератор-двигатель внутреннего сгорания и т.д.

С учетом всех принятых ограничений и упрощений уравнение движения для первого вида машинных агрегатов будет

$$J \frac{d\omega}{dt} - B\omega = (A - a_0) - a_1 \cos \omega_{\varphi} t - b_1 \sin \omega_{\varphi} t - a_2 \cos 2\omega_{\varphi} t - b_2 \sin 2\omega_{\varphi} t - \dots - a_n \cos n\omega_{\varphi} t - b_n \sin n\omega_{\varphi} t, \quad (1)$$

где A и B — параметры, характеризующие движущий момент; $a_0, a_1, b_1, \dots, a_n, b_n$ — параметры, характеризующие момент сопротивления.

Для условий установившегося режима решение уравнения движения примет вид:

$$\omega = \frac{A - a_0}{B} - \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{B^2 + J^2 \omega_{\varphi}^2}} \sin(\omega_{\varphi} t + \beta_1) - \dots - \sqrt{\frac{a_n^2 + b_n^2}{B^2 + J^2 \omega_{\varphi}^2}} \sin(n\omega_{\varphi} t + \beta_n), \quad (2)$$

где $\frac{A - a_0}{B} = \omega_{\varphi} = \omega_0$ — среднее значение угловой скорости, относительно

но которой происходят колебания скорости при установившемся номинальном режиме, $\sqrt{\frac{a_n^2 + b_n^2}{B^2 + n^2 \omega_{\varphi}^2}}$ — амплитуда n -ой гармоники, β_n — сдвиг фаз, определяемый соотношением

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{B a_n - n b_n \omega_{\varphi}}{B b_n + n a_n \omega_{\varphi}} \quad (3)$$

Уравнение (1) для обоих видов машинных агрегатов имеет один и тот же вид, за исключением знаков слагаемых, стоящих в правой части. Следовательно, его решение справедливо для машинных агрегатов как первого, так и второго видов. Различия в решениях $\omega(t)$ будет заключаться только в том, что колебания угловой скорости обоих случаев будут находиться в противофазе. В дальнейшем все рассуждения будут проводиться для агрегатов первого вида, но они будут справедливы и для агрегатов второго вида.

При решении задачи в первом приближении, т.е. при удержании в функции $M_c(\varphi)$, разложенной в ряд Фурье, только первой гармоники

$$M_c = a_0 + a_1 \cos \omega_{\varphi} t + b_1 \sin \omega_{\varphi} t = a_0 + \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \sin(\omega_{\varphi} t + \xi_1) \quad (4)$$

уравнение (2) приобретает вид:

$$\omega - \omega_{\varphi} - \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{B^2 + \omega_{\varphi}^2}} \sin(\omega_{\varphi} t + \beta_1) \quad (5)$$

Выразив из уравнения (5) экстремальные значения угловой скорости и используя соотношение для коэффициента неравномерности

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\varphi}} \quad (6)$$

найдем необходимую величину момента инерции

$$J = \frac{1}{\delta \omega_{\varphi}^2} \sqrt{4(a_1^2 + b_1^2) - (B \delta \omega_{\varphi})^2} \quad (7)$$

т.е. получим решение поставленной задачи.

Формула (7) даёт зависимость величины необходимого момента инерции от коэффициента неравномерности δ , средней угловой скорости ω_{φ} , параметров, характеризующих рабочую машину (a_1, b_1) и параметра, характеризующего двигатель (B).

Параметр B определяет наклон характеристики момента, зависящего от скорости. Для более наглядного изображения влияния скоростной зависимости $M(\omega)$ на величину необходимого момента инерции J введём безразмерный параметр k .

$$k = \frac{\omega_{\varphi}}{\omega_{\varphi} + \Delta \omega} \quad (8)$$

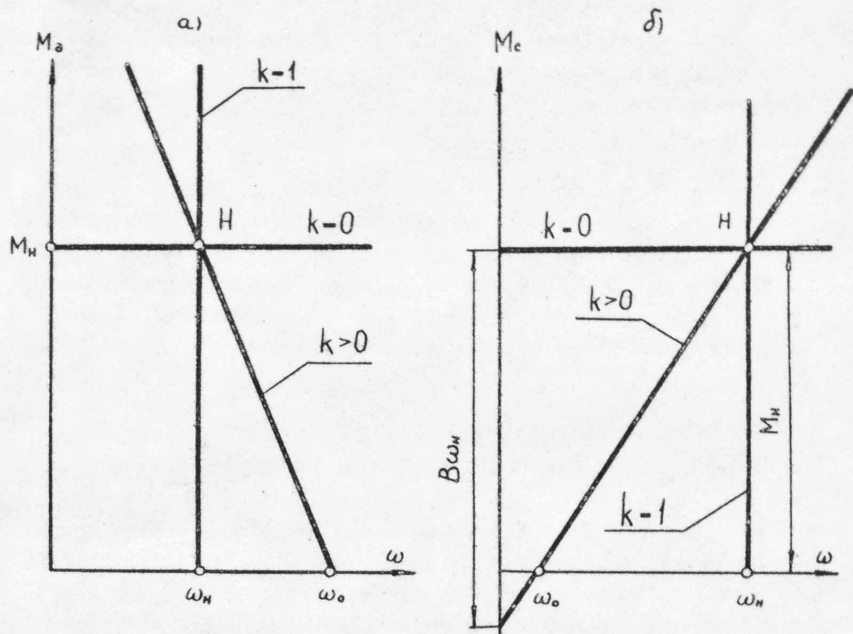


Рис. 1

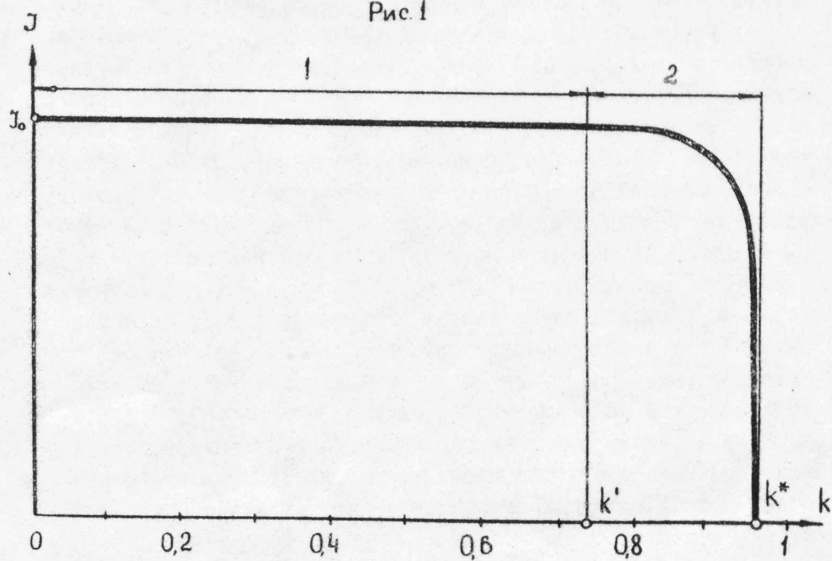


Рис. 2

где $\Delta\omega = |\omega_p - \omega_0|$, $\omega_p = \omega_n$ (рис.1). k всегда меньше единицы, как видно из формулы (8). Параметр k связан с параметром B следующим образом

$$k = \frac{B\omega_p}{B\omega_p + M_{cp}} \quad (9)$$

и изменяется в пределах от 0, когда момент не зависит от угловой скорости (горизонтальная характеристика), до 1 (вертикальная характеристика) (рис.1, а и б). Таким образом, параметр k есть мера наклона характеристики момента, зависящего от скорости. Непосредственно через величину k необходимый момент инерции можно выразить, используя соотношение (9):

$$J = \frac{1}{\delta\omega_p^2} \sqrt{4(a^2 + b^2) - (M_{cp} \frac{\delta k}{1-k})^2} \quad (10)$$

График зависимости $J = J(k)$ показан на рис.2. Значения J подсчитаны по формуле (10) для различных наклонов характеристики $M_s(\omega)$.

На графике совершенно четко видны две резко различающихся по своему характеру зоны.

Зона I, лежащая в пределах изменения параметра k от 0 до k' , является зоной практически постоянного значения необходимой величины момента инерции J . Значение k' зависит от коэффициента неравномерности δ и в каждом конкретном случае может быть определено. Для реальных величин коэффициента неравномерности машинных агрегатов k' изменяется от 0,8 до 0,98. Зона I очень широкая зона в которой учет зависимости $M(\omega)$ практически не влияет на величину необходимого момента инерции J . У очень многих машинных агрегатов (все транспортные д.в.с., буровое оборудование с приводом от д.в.с., машинные агрегаты с электроприводом от серийных и компаундных двигателей и т.д.) характеристика момента, зависящего от скорости, имеет параметр $k < k'$. Таким образом, для очень многих машинных агрегатов при подсчете J нет необходимости учитывать влияние зависимости $M(\omega)$. Иными словами, $J = J_0$, где J_0 — момент инерции, найденный без учета скоростной зависимости, т.е. считая $M = \text{const}(\omega)$.

Следовательно, существующие методы определения величины момента инерции без учета зависимости сил от скорости верны для очень многих машинных агрегатов, у которых зависимость $M(\omega)$ не выражена очень резко.

Зона 2, в которой параметр k изменяется в пределах от k' до k'' , является зоной резкого падения величины необходимого момента инерции J . В зоне 2 даже небольшое изменение наклона характеристики момента, зависящего от скорости, весьма значительно влияет на величину необходимого момента инерции J . В эту зону входят машинные агрегаты, у которых рабочая машина создает периодически изменяющуюся нагрузку, а привод осуществляется от асинхронного или шунтового электродвигателя, которые имеют параметр $k = 0,9 - 0,96$.

Дадим физическое объяснение слагаемых подкоренного выражения формулы (7). Для этого представим изменение движущего момента и момента сопротивления в функции угла поворота машинного агрегата.

$$M_d = (A - B\omega_p) + \frac{1}{2} B \delta \omega_p \sin(\varphi + \beta), \quad (11)$$

$$M_c = a_0 + a_1^2 + b_1^2 \sin^2(\varphi + \delta), \quad (12)$$

Первое слагаемое под корнем в формуле (7) является квадратом удвоенной амплитуды момента сопротивления M_c . Из гармонического анализа известно, что удвоенной амплитуде численно равна площадь полуволны синусоиды. С другой стороны, площадь на графике $M_c(\varphi)$ изображает работу. Поэтому физическое толкование первого слагаемого подкоренного выражения уравнения (7) таково: оно представляет собой квадрат работы переменной части момента сопротивления M_c за половину периода $-(A_{c\frac{1}{2}})^2$.

Второе слагаемое подкоренного выражения в формуле (7) равно квадрату удвоенной амплитуды движущего момента [см. формулу (II)]. Следовательно, физически оно представляет собой квадрат работы переменной части движущего момента за половину периода $-(A_{d\frac{1}{2}})^2$.

Таким образом, формулу (7) можно записать в энергетическом виде:

$$J = \frac{1}{\delta \omega_p^2} \sqrt{A_{c\frac{1}{2}}^2 - A_{d\frac{1}{2}}^2}. \quad (13)$$

Квадратный корень в формуле (13) есть наибольшее приращение кинетической энергии за цикл $\Delta T_{кин}$. Поэтому формула (13), а следовательно, и формула (7) есть частное выражение общей формулы для определения момента инерции J , известной из теории механизмов:

$$J = \frac{\Delta T_{кин}}{\delta \omega_p^2}. \quad (14)$$

Тот факт, что при обострении зависимости $M(\omega)$, т.е. при увеличении k , необходимая величина J уменьшается, объясняется способностью машин, момент которых зависит от скорости, к саморегулированию. Однако амплитуда движущего момента $M_{a\omega} = \frac{1}{2} B \delta \omega$ зависит не только от наклона характеристики, определяемого величиной параметра B (или k), но и от коэффициента неравномерности δ , который представляет собой малую дробь. Это значит, что амплитуда движущего момента $M_{a\omega}$ также является малой величиной. Поэтому при значительном изменении параметра B , начиная от 0 (что соответствует изменению параметра k в интервале $0 - k'$), амплитуда движущего момента также изменяется от 0, оставаясь, однако, весьма небольшой. Малая неравномерность вращения подавляет способность двигателя к саморегулированию (зона I, рис. 2). Для того, чтобы способность двигателя к саморегулированию смогла бы себя проявить, преодолев подавляющее действие малой δ , необходимо весьма резко обострить зависимость $M_{a\omega}$, сделав наклон этой характеристики очень крутым, а величину параметра k близкой к единице (зона 2, рис. 2).

Однако необходимая величина момента инерции зависит, строго говоря, не от моментов, а от избыточной работы, вызывающей перепад кинетической энергии $\Delta T_{наиб}$. А на этот перепад влияет не только соотношение между амплитудами моментов, но также и сдвиг фаз между колеблющимися моментами M_a и M_c . Для уменьшения $\Delta T_{наиб}$ двигатель должен не только изменить в должной мере свой момент, но и сделать это своевременно. В диссертации рассмотрено, как влияет изменение наклона характеристики $M_{a\omega}$, определяемого параметром B (или k), на амплитудное значение момента $M_{a\omega}$, а также на сдвиг фаз и величину $\Delta T_{наиб}$, а следовательно, на необходимое значение момента инерции J . Показано, что при обострении зависимости $M_{a\omega}$ (увеличении B или k) не только изменяется амплитудное значение $M_{a\omega}$, увеличиваясь от 0 до амплитудного значения момента сопротивления, но изменяется также и сдвиг фаз между синусоидами $M_a(\varphi)$ и $M_c(\varphi)$, уменьшаясь от 90° до 0° . По мере увеличения параметра B (или k) уменьшение фазы происходит сначала весьма медленно; однако, когда k близко к 1, уменьшение фазы происходит очень резко. За счет влияния обеих этих причин — увеличения амплитуды и уменьшения фазы — законы из-

менения моментов $M(\omega)$ и $M_c(\omega)$ сближаются. Практически это сближение начинается только при значениях k близких к 1, что соответствует весьма крутому наклону характеристики $M(\omega)$, и происходит очень резко. Благодаря этому уменьшается $\Delta T_{наг}$, а значит, и величина необходимого момента инерции J .

Таково физическое истолкование характера графика $J = J(k)$. Таковы причины существования на этом графике двух резко отличных друг от друга зон.

Преобразуем формулу (10) к виду

$$J = \frac{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\delta \omega_1^2} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{\omega}}{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}\right)^2 \left(\frac{\delta k}{1-k}\right)^2}, \quad (15)$$

обозначим

$$\delta^* = \frac{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{M_{\omega}} \quad (16)$$

коэффициент колебания периодической нагрузки. Тогда

$$J = \frac{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\delta \omega_1^2} \sqrt{1 - \delta^{*2} \frac{1}{2} \left(\frac{k}{1-k}\right)^2}. \quad (17)$$

Обозначим

$$\alpha = \sqrt{1 - \delta^{*2} \frac{1}{2} \left(\frac{k}{1-k}\right)^2}. \quad (18)$$

Все величины, входящие в формулу (18), безразмерные, характеризующие: δ — неравномерность вращения, k — крутизну наклона характеристики момента, зависящего от ω , δ^* — колебания периодической нагрузки. В уравнении (16) выражение, стоящее перед корнем

$$\frac{2\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\delta \omega_1^2} = J_0$$

значение момента инерции, найденное без учета влияния зависимости $M(\omega)$.

Таким образом,

$$J = J_0 \alpha, \quad (19)$$

где α — поправочный коэффициент, учитывающий влияние скорости на момент.

В диссертации рассмотрено влияние наклона характеристики $M(\omega)$ на величину необходимого момента инерции при различных коэффициентах неравномерности δ . При грубых значениях δ ($\delta = 0,1; 0,05$) спад графика $J = J(k)$ начинается раньше, зона 2 становится шире, саморегулирование, преодолев подавляющее влияние δ , проявляется раньше. При более "тонких" δ , наоборот, расширяется зона 1, в которой J практически равно J_0 , а зона 2 становится очень узкой. В диссертации рассмотрено влияние величины коэффициента δ^* на протекание функциональной зависимости $J = J(k)$. График семейства $\alpha(k)$ с параметром δ^* при неизменном δ

приведен в диссертации.

Если у нагрузки, зависящей от угла поворота φ , определяющей является не первая гармоника, а гармоника n -го порядка, то в более общем виде формулу (7) можно записать так:

$$J = \frac{1}{n^2 \omega_{\varphi}^2} \sqrt{4(a_n^2 + b_n^2) - (8\delta\omega_{\varphi})^2}, \quad (20)$$

где n — порядок той гармоники, которая в каждом конкретном случае является наиболее влияющей.

В диссертации рассмотрено решение задачи во II-ом приближении, что оказалось очень сложным. Для определения момента инерции в этом случае необходимо решить уравнение четвертой степени, что и было выполнено. На основании решения этого уравнения для различных наклонов характеристики был построен график $J = J(k)$ при II-ом приближении, который имеет такой же вид как и график при I-ом приближении (рис. 2), т.е. две ранее отмеченные зоны сохраняются. Если в разложении $M_c(\varphi)$ в ряд Фурье удерживать члены с более высокими частотами, то уравнение для определения J получается ещё более высокого порядка, т.е. более высокие частоты делают аналитический расчет практически невыполнимым.

В главе III рассмотрен динамический синтез при периодическом моменте, изменяющимся по ступенчатому закону рис. 3, А.

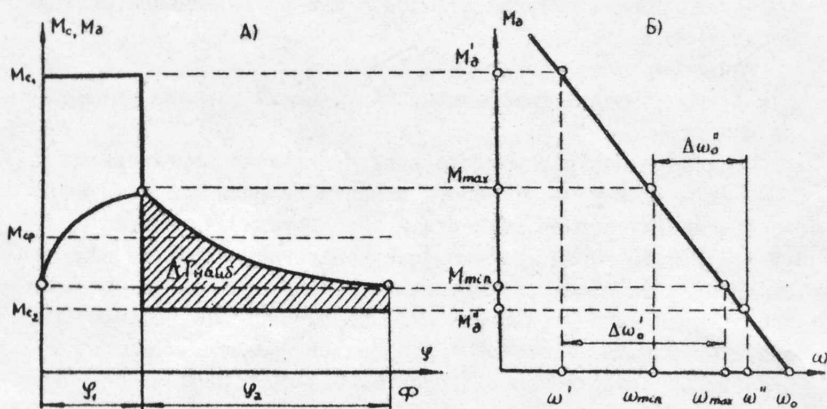


Рис 3

Для характеристики различного деления цикла Φ на участки рабочего и холостого хода введен безразмерный коэффициент импульсности нагрузки

$$\lambda = \frac{\Phi}{\varphi_1} > 1, \quad (21)$$

который изменяется в пределах $1 < \lambda < \infty$. Соотношение между моментом сопротивления на участках рабочего и холостого хода $M_{с1}$ и $M_{с2}$ характеризуется безразмерным коэффициентом

$$h = \frac{M_{с1}}{M_{с2}} > 1, \quad (22)$$

изменяющимся в пределах $1 < h < \infty$. Через эти два параметра λ и h и через $M_{\varphi} = \frac{A_{\text{инерция}}}{\Phi}$ выражены величины $M_{с1}$ и $M_{с2}$.

Дифференциальное уравнение движения при ограничениях и упрощениях, указанных в главе I, решено для ступенчатой нагрузки на каждом участке относительно ω . Затем по уравнению $M_s = A - B\omega$, были получены выражения для $M_s(\varphi)$.

Для участка рабочего хода:

$$\omega = \omega' + \Delta\omega'_0 e^{-t/\tau}, \quad (23)$$

$$M_s = M'_0 - (M'_0 - M_{\text{мин}}) e^{-\varphi/\omega\varphi\tau}, \quad (24)$$

для участка холостого хода

$$\omega = \omega'' - \Delta\omega''_0 e^{-t/\tau}, \quad (25)$$

$$M_s = M''_0 + (M_{\text{max}} - M''_0) e^{-\varphi/\omega\varphi\tau}, \quad (26)$$

где $\tau = \frac{J}{B}$, а отсчет времени и углов для каждого участка идет от его начала.

Вычисляя величину наибольшего перепада кинетической энергии $\Delta T_{\text{инер}} в условиях установившегося режима и используя известное соотношение (14) получаем уравнение$

$$\frac{B \delta \omega_{\varphi}}{\lambda M_{\varphi}} \frac{(h + \lambda - 1)}{(h - 1)} = \frac{(1 - e^{-\varphi_1/\omega\varphi\tau})(1 - e^{-\varphi_2/\omega\varphi\tau})}{(1 - e^{-\Phi/\omega\varphi\tau})} \quad (27)$$

Из этого уравнения определяется τ , а затем и искомая величина момента инерции J .

В общем виде уравнение (27) практически решается для случаев $\lambda = 2, 3, 4, 5$. Для случаев $\lambda = 2$ и $\lambda = 3$ получены формулы, по которым вычисляется величина J . Как и в случае гармонической нагрузки необходимое значение J представлено в виде $J = J_0 \alpha$, где J_0 — момент инерции найденный без учета сил от скорости,

α - поправочный коэффициент, учитывающий влияние $M(\omega)$.
Момент инерции J_0 подсчитывается по формуле

$$J_0 = \frac{M_0 F}{\delta \omega_{\varphi}^2} \frac{(\lambda-1)(\lambda-1)}{\lambda(\lambda+1)} \quad (28)$$

Коэффициент α и в случае ступенчатой нагрузки можно выразить через коэффициент k , характеризующий крутизну зависимости $M(\omega)$. Так при $\lambda = 2$

$$\alpha = \frac{\delta \Psi(\lambda+1)}{2(\lambda-1) \ln \frac{2(\lambda-1) + \delta \Psi(\lambda+1)}{2(\lambda-1) - \delta \Psi(\lambda+1)}}, \quad (29)$$

при $\lambda = 3$

$$\alpha = \frac{\delta \Psi(\lambda+2)}{2(\lambda-1) \ln \frac{2[3(\lambda-1) + \delta \Psi(\lambda+2)]}{\sqrt{36(\lambda-1)^2 - 3[\delta \Psi(\lambda+2)]^2} - \delta \Psi(\lambda+2)}}, \quad (30)$$

где $\Psi = \frac{k}{1-k}$, а зависимость k от B дается формулой (9).

По формулам (29) и (30) были построены графики зависимости $\alpha(k)$ (или, что то же $J(k)$). Вид этих графиков оказался таким же, как и на рис. 2, т.е. вновь выявились две описанные ранее характерные зоны.

В диссертации дано физическое истолкование своеобразного вида зависимости $J(k)$, установленной также и при ступенчатом нагружении. При этом выяснено, что если в случае гармонической нагрузки величина $\Delta T_{\text{наиб}}$ уменьшается при увеличении параметра k за счет возрастания амплитуды M_{α} и уменьшения сдвига фаз между синусоидами $M_1(\omega)$ и $M_2(\omega)$, то в случае ступенчатой нагрузки уменьшение $\Delta T_{\text{наиб}}$ происходит за счет увеличения размаха $[(M_{\text{max}} - M_{\text{min}})]$, рис. 3] и кривизны экспонент движущего момента, представленного в функции Ψ , что приводит к сближению функциональных зависимостей $M_1(\omega)$ и $M_2(\omega)$.

В диссертации рассмотрен частный случай ступенчатой нагрузки, когда $M_2 = 0$, т.е. $\lambda = \infty$. Для этого случая также получена формула общего вида $J = J_0 \alpha$ и выражение поправочного коэффициента α через δ и k при $\lambda = 2$ и $\lambda = 3$.

Если коэффициент импульсности $\lambda > 3$, то аналитическое решение уравнения (27) либо чрезвычайно сложно (для $\lambda = 4$ и 5), а потому не может быть использовано, либо при $\lambda > 5$ теоретически вообще невозможно. Поэтому при $\lambda > 3$ для ЭЦВМ Минск - 22 составлены программы, по которым просчитаны значения поправоч-

ного коэффициента α для различных k при значениях $\delta = \frac{1}{10}$, $\delta = \frac{1}{15}$, $\delta = \frac{1}{50}$, $h = 2 - \infty$, $\lambda = 4 - 15$. Эти программы и значения α даны в таблицах, приложенных к настоящей диссертации. Пользуясь таблицами, легко определить по заданным условиям значение поправочного коэффициента α , а затем и искомую величину момента инерции J . Если λ или h не являются целыми числами, то поправочный коэффициент α находится по таблицам методом интерполяции.

На основании расчетов на ЭЦВМ проведено исследование влияния величин δ , λ и h на протекание функциональной зависимости $J = J(k)$. Результаты этого исследования изображены на графиках, приведенных в диссертации.

В работе даны рекомендации по аппроксимации плавных нагрузок - гармонической, а импульсных и нагрузок с разрывами - ступенчатой. Благодаря этому формулы и расчеты, которые приведены в диссертации для двух нагрузок, являющихся типовыми, можно применять для широкого круга нагрузок.

В главе IV описана экспериментальная часть диссертационной работы. Целью экспериментов было проверить достоверность результатов, полученных теоретическим путем. Опыты были проведены в лаборатории "Теории механизмов" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

В качестве объекта для экспериментов был взят поперечно-строгальный станок с приводом от асинхронного электродвигателя. Стругальный станок создавал периодически изменяющуюся нагрузку, а момент асинхронного двигателя зависел от скорости вращения. Изменение наклона характеристики $M_0(\omega)$ возможно было осуществить благодаря тому, что асинхронный двигатель был взят с фазным ротором, в цепь которого включалось сопротивление разной величины. Этим самым изменялась величина коэффициента k наклона характеристики $M_0(\omega)$. Параметр h ступенчатой нагрузки изменялся заданием различной глубины резания, а параметр λ - вследствие того, что протрагивались изделия разной длины.

Эксперимент состоял из двух частей. Первая (вспомогательная) часть - снятие характеристик $M_0(\omega)$ электродвигателя при различных сопротивлениях в цепи ротора и определение коэффициентов k наклона этих характеристик. Вторая (главная) часть - циллографирование закона вращения главного вала $\omega = \omega(t)$ при раз-

личных, уже известных коэффициентах k наклона характеристик $M_a(\omega)$ и различных параметрах h и λ .

Для осциллографирования был взят шлейфовый осциллограф Н700. Датчиком угловой скорости служил тахогенератор.

Из осциллограмм были взяты изменения угловой скорости, по которым подсчитывались величины коэффициента неравномерности δ . Затем коэффициент неравномерности δ был подсчитан теоретически при различных значениях k , h и λ , равных соответственно тем, при которых были сняты осциллограммы и были построены графики $\delta = \delta(k)$ при различных h и λ . На эти графики были нанесены экспериментальные точки. Нанесение показало, что результаты теоретических подсчетов и эксперимента достаточно близки друг к другу. Экспериментальные точки подтвердили наличие двух зон у зависимости $\delta = \delta(k)$ — зоны постоянного значения δ , не зависящего от наклона характеристики $M_a(\omega)$ и зоны спада зависимости $\delta(k)$. Кроме того, эксперименты подтвердили характер влияния параметров h и λ на протекание зависимости $\delta(k)$.

ВЫВОДЫ.

1. Влияние характеристики $M(\omega)$ на величину необходимого момента инерции J проявляет себя очень своеобразно (рис. 2). Если наклон характеристики $M(\omega)$ выражен не очень резко, то эта характеристика практически не влияет на величину момента инерции, так что известные методы определения величины J без учета зависимости $M(\omega)$ дают вполне удовлетворительный результат. Если же наклон характеристики $M(\omega)$ выражен очень резко (асинхронные и шунтовые электродвигатели), то эта характеристика значительно влияет на величину момента инерции, уменьшая его при увеличении своего наклона.
2. Необходимый момент инерции J может быть подсчитан по формуле $J = J_0 \cdot \alpha$, где J_0 — момент инерции, найденный без учета влияния характеристики $M(\omega)$, а α — коэффициент, учитывающий это влияние.
3. Аналитически составлены формулы для подсчета коэффициента α [см. уравнения (18), (29) и (30)] при различных видах нагружения. В случае сложных видов нагружения по аналитическим формулам составлены программы для подсчета коэффициента α на ЭЦВМ, а также приведены таблицы вычисленных значений коэффициента α .

Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Волкова И.П. Динамическое исследование механизмов, работающих в установившемся режиме, с учетом зависимости сил от скорости. Известия ВУЗов. "Машиностроение", №7, 1973 г.
2. Мусатов А.К., Волкова И.П. Определение момента инерции маховых масс с учетом зависимости сил от скорости. Труды МВТУ № 160. Теория механизмов, вып. 6, 1973 г.