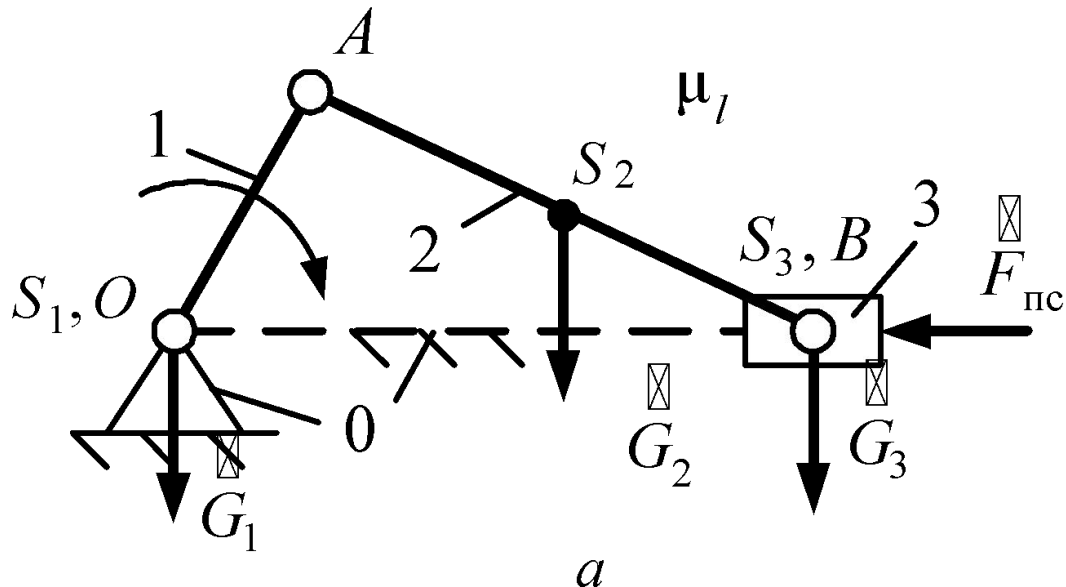


Тема 8

- Рассмотрим *пример*: получить *динамическую модель* кривошипно-ползунного механизма (см. рис. *a*), если известны длины звеньев, положения их центров масс (S_1, S_2 и S_3), моменты инерции звеньев относительно осей, проходящих через центры масс, линейные и угловые скорости звеньев и их центров масс, а также их направления, угловые скорости кривошипа и шатуна и сила полезного сопротивления ($F_{\text{пс}}$), приложенная к звену 3.

Вычерчиваем механизм в выбранном масштабе длин (μ_l), в заданном положении кривошипа *1* (см. рис. *a*).

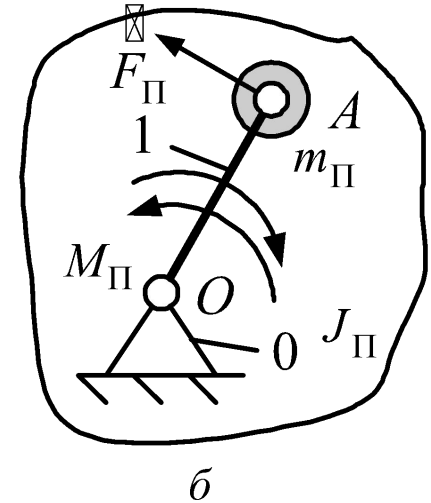


Тема 8

- В качестве **звена приведения** выберем кривошип 1 (см. рис. б). Тогда приведенный момент инерции на основании (6)

$$J_{\Pi} = J_{s1} + J_{s2} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + m_2 \left(\frac{V_{s2}}{\omega_1} \right)^2 + m_3 \left(\frac{V_B}{\omega_1} \right)^2,$$

где J_{s1}, J_{s2} – моменты инерции звеньев относительно осей, проходящих через центры масс; m_2, m_3 – массы звеньев; ω_1, ω_2 – угловые скорости звеньев; V_{s2}, V_B – линейные скорости звеньев.



Приведенный момент сил согласно (3)

$$M_{\Pi} = \frac{G_{\text{вс}} \cdot V_{s2}}{\omega_1} \cos \left(\overset{\boxtimes}{G}_2, \overset{\boxtimes}{V}_{s2} \right) - \frac{F \cdot V_B}{\omega_1} \cos \left(\overset{\boxtimes}{F}_{\text{пс}}, \overset{\boxtimes}{V}_B \right),$$

где $G_2 = m_2 g$ – сила тяжести звена 2; g – ускорение свободного падения; $F_{\text{пс}}$ – сила полезного сопротивления.

Если за **точку приведения** выбрать т. А, то, используя вышеприведенные зависимости, можно получить эквивалентные значения приведенной массы

и приведенной силы:

$$m_{\Pi} = \frac{I_{\Pi}}{l_{OA}^2}; \quad F_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{l_{OA}}.$$

Тема 8

● 8.5. Режимы движения машинных агрегатов и их энергетические характеристики

Полным временем движения машинного агрегата называется промежуток времени от начала движения до его окончания. Это время состоит из трех периодов: разбега; установившегося движения и выбега.

Покажем их на тахограмме:

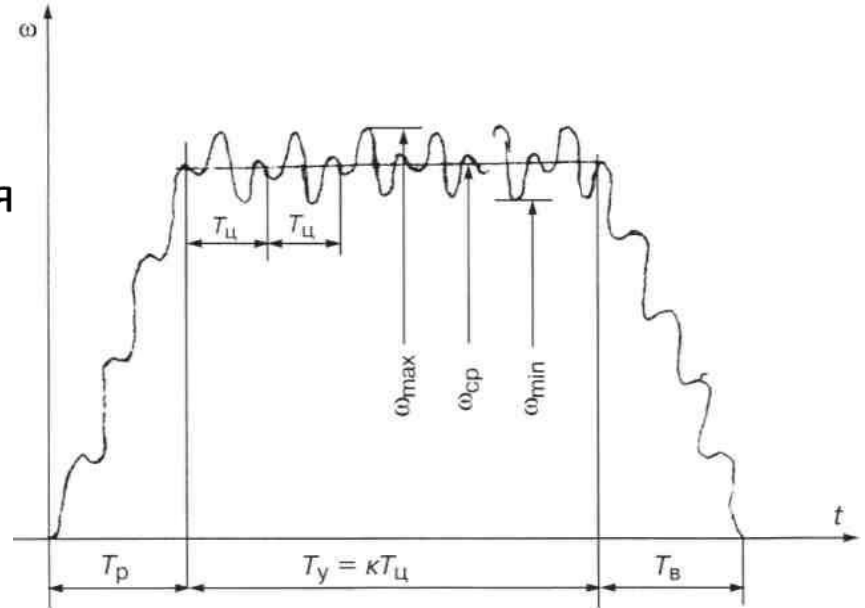
$$T = T_p + T_y + T_b.$$

1. Период *разбега* (T_p) характеризуется нарастанием скорости ведущего звена до некоторого среднего значения ($\omega_{\text{ср}}$), соответствующего рабочей скорости машинного агрегата.

Необходимым условием для разгона является превышение работы движущих сил над силами сопротивления

$$A_d > A_c,$$

т. е. суммарная работа в режиме разгона всегда положительна $A_\Sigma > 0$.



Тема 8

2. Период *установившегося движения* (T_y) – период движения, при котором угловая скорость ведущего звена колеблется около среднего значения ω_{cp} .

Это время состоит из ряда циклов

$$T_y = k T_{ц},$$

где $T_{ц}$ – длительность цикла;

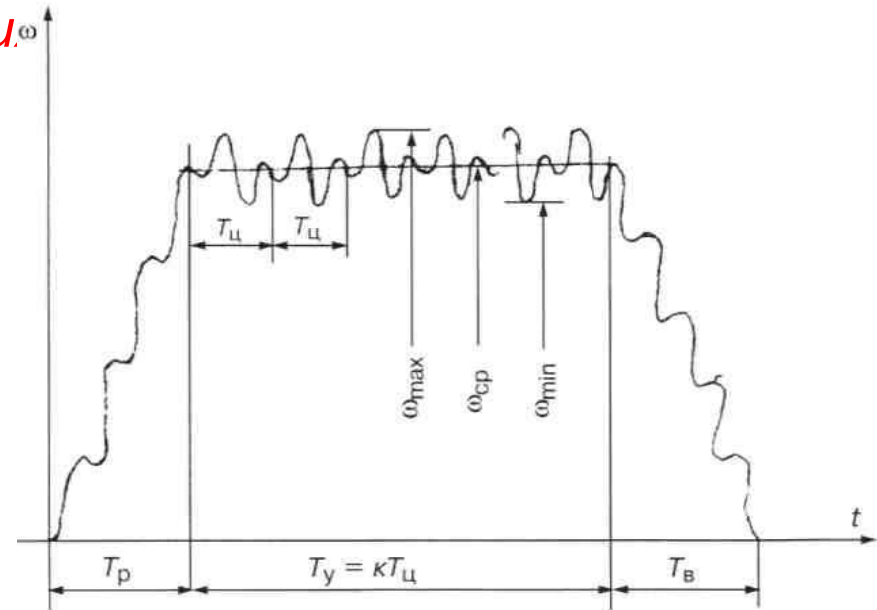
k – число циклов.

Циклом установившегося движения называется промежуток времени, по истечении которого положение, скорость и ускорение ведущего звена принимают постоянные значения.

За цикл движения работа движущих сил должна быть равна работе сил сопротивления

$$A_d = A_c.$$

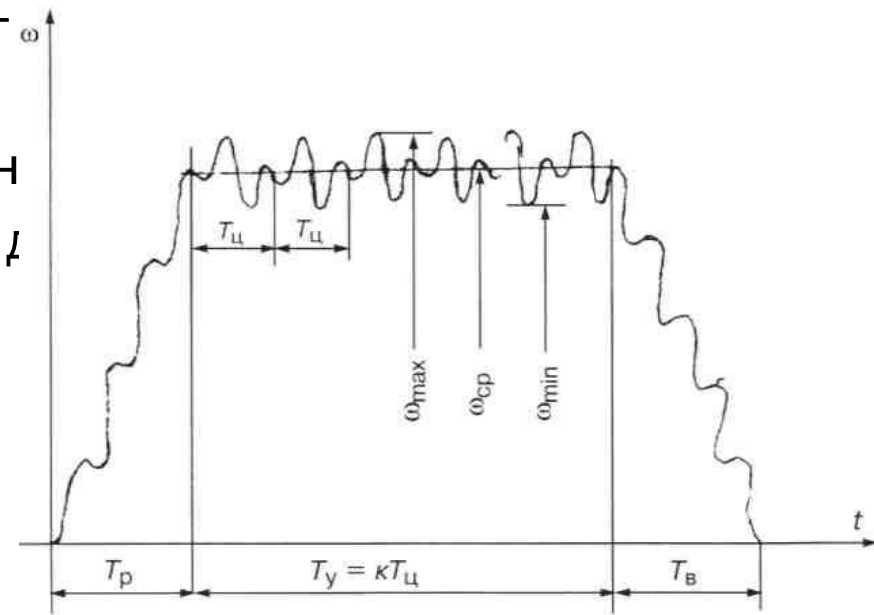
Такое движение называется *периодическим*, при котором машинный агрегат обладает постоянными циклами движения.



Тема 8

3. **Период выбега** или **остановки** (T_B) – период времени, в течение которого происходит снижение скорости движения ведущего звена от среднего значения до нуля.

Необходимым условием для выбега является превышение работы сил сопротивления над работой движущих сил



$$A_d < A_c.$$

Режимы «разбега» и «выбега» сопровождаются **переходными** процессами и, в зависимости от структуры машинного агрегата и характера действия силовых факторов, протекают в период от нескольких долей до десятков секунд.

Тема 8

Исследование *переходных режимов* необходимо для нахождения *времени срабатывания* машинного агрегата, которое определяет быстроедействие многих рабочих машин, работающих в так называемых *старт-стопных* режимах: автооператоры, промышленные роботы и манипуляторы, поворотные и тактовые столы, загрузочные и подающие устройства, вспомогательное технологическое оборудование автоматических линий и т.п.

Стремление к повышению производительности этих устройств может привести к возникновению больших ускорений, вызывающих значительные динамические нагрузки и упругие колебания исполнительных механизмов, которые нарушают точность функционирования, увеличивают время выполнения операций и снижают прочность основных элементов и надежность работы. Таким образом, при создании подобных машин возникает задача *учета упругих свойств* конструкции и разработки методов и средств ограничения колебательных движений. Кроме того, в периоды разбега и выбега необходимо решать проблему *прохода* через критические зоны, когда угловая скорость ведущего вала машинного агрегата становится равной одной из собственных частот колебаний, при которых механическая система попадает в резонанс. Длительное пребывание в

Тема 8

В режиме *установившегося движения* работает большинство технологических и энергетических машин: металлорежущие станки, кривошипные прессы, прокатные станы, электродвигатели, электрогенераторы, насосы, компрессоры, двигатели внутреннего сгорания и т.д. Наилучшим условием работы этих машин является *равномерное* вращение ведущего звена.

За цикл установившегося движения изменение кинетической энергии равно нулю ($\Delta T = 0$). Однако внутри цикла угловая скорость ведущего звена может *меняться* из-за несовпадения законов изменения движущих сил и сил сопротивления, а также непостоянства значений приведенного момента инерции машинного агрегата. Например, для механизмов станков и поршневых насосов и компрессоров приведенный момент движущих сил является постоянной величиной, а приведенный момент сил сопротивления – переменной. Для механизмов двигателей внутреннего сгорания и паровых машин постоянным является приведенный момент сил сопротивления, а переменным – приведенный момент движущих сил. Приведенный момент инерции машинного агрегата также является переменной величиной при изменении положений ведущего звена. В результате этого значение скорости движения его ведущего звена *колеблется* в течение рассматриваемого

Тема 8

● Наличие в машинном агрегате колебательных движений – основная причина неравномерности движения ведущего звена, называемая *неравномерностью хода*, для оценки которой используется *коэффициент неравномерности хода*:

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{cp}},$$

где ω_{min} , ω_{max} – минимальное и максимальное значения скорости; ω_{cp} – среднее значение скорости ведущего звена.

Чем больше коэффициент неравномерности, тем больше колебания скорости. Колебания скорости движения ведущего звена машинного агрегата вызывают дополнительные динамические (инерционные) нагрузки, а также дополнительное трение в кинематических парах, снижающее надежность машинного агрегата и его КПД. Кроме того, колебания скорости ухудшают рабочие технологические процессы, связанные, например, с металлообработкой или с равномерной подачей заготовок и т. д.

На практике коэффициент неравномерности имеет значения от десятых до сотых и, даже тысячных, долей единицы. Например, для ударных машин и прессов $\delta \leq 0,2$, для металлорежущих станков $\delta = 0,04 - 0,02$, для двигателей внутреннего сгорания $\delta \leq 0,01$.

Тема 8

Тема 8. Уравнения движения машинного агрегата и их исследование

8.1. Уравнения движения машинного агрегата в энергетической и дифференциальной формах

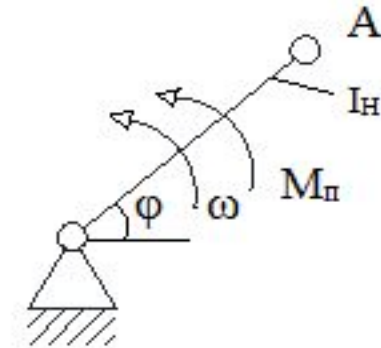
Выполним приведение сил и масс машинного агрегата, выбрав в качестве звена привода кривошипа.

Здесь φ – угол поворота кривошипа;

ω – угловая скорость звена привода;

I_n – приведенный момент инерции;

M_{π} – приведенный момент сил.



Запишем уравнение, выражающее теорему об изменении кинетической энергии

$$T - T_0 = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (1)$$

где T_0 – кинетическая энергия в начале движения; T – кинетическая энергия в конце движения; A_i – сумма работ внешних сил, действующих на машинный агрегат.

Тема 8

Это уравнение может быть представлено как в энергетической, так и в дифференциальной формах.

Рассмотрим перемещение звена приведения из начального положения φ_0 в некоторое конечное φ под действием момента M_{Π} . На основании уравнения (1) получим

$$\frac{I_{\Pi} \cdot \omega^2}{2} - \frac{I_{\Pi 0} \cdot \omega_0^2}{2} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\Pi} d\varphi, \quad (2)$$

где φ_0 , φ – начальное и конечное значения угла поворота; ω_0 , ω – начальное и конечное значения угловой скорости; $I_{\Pi 0}$, I_{Π} – значения приведенного момента инерции в начальном и конечном положениях; $M_{\Pi} = M_{\delta} - M_c$ – приведенный момент внешних сил и моментов сил; M_{δ} – приведенный момент движущих сил; M_c – приведенный момент сил сопротивления.

Уравнение (2) называется *уравнением движения* машинного агрегата в *энергетической форме*.

В этом уравнении искомой величиной является скорость ω звена приведения (в данном случае – кривошипа). Разрешив его относительно скорости, путем интегрирования можно найти закон движения начального звена машинного агрегата, т.е. решить прямую задачу

Тема 8

● В общем случае верхний предел интегрирования φ в уравнении (2) считается *переменным*. Если вся нагрузка, приложенная к машинному агрегату, зависит только от его положения, то и суммарный приведенный момент есть функция только координаты φ . В этом случае уравнение решается непосредственно относительно искомой величины ω

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_n(\varphi) d\varphi}{I_n} + \frac{I_{no}}{I_n} \omega^2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что в уравнении (3) необходимо учитывать знак интеграла под корнем.

Получим уравнение движения в дифференциальной форме. Продифференцируем уравнение (2) по переменной φ

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{I_n \omega^2}{2} \right) = M_n.$$

Определим производную, стоящую в левой части уравнения, учитывая, что, в общем случае, переменными величинами являются не только угловая скорость ω , но и приведенный момент инерции I_n .

Тема 8

- Определим производную, стоящую в левой части уравнения, учитывая, что, в общем случае, переменными величинами являются не только угловая скорость ω , но и приведенный момент инерции I_n . Поэтому

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{I_n \omega^2}{2} \right) = I_n \omega \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dI_n}{d\varphi} = I_n \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dI_n}{d\varphi} \omega^2,$$

откуда получим дифференциальное уравнение второго порядка относительно угла поворота кривошипа

$$I_n \varepsilon + \frac{1}{2} \omega^2 \frac{dI_n}{d\varphi} = M_n. \quad (4)$$

где $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение звена приведения.

Уравнение (4) называется *уравнением движения* машинного агрегата в *дифференциальной форме*. При использовании этого уравнения необходимо помнить, что приведенный момент M_n , а также производная приведенного момента инерции являются алгебраическими величинами и подставляются со своими знаками.

В случае постоянного момента инерции ($I_n = const$) уравнение (4) примет вид

$$I_n \varepsilon = M_n. \quad (5)$$

Тема 8

- С помощью уравнения (4) можно определить величину углового ускорения начального звена

$$\varepsilon = \frac{M_n}{I_n} - \frac{\omega^2}{2I_n} \frac{dI_n}{d\varphi}. \quad (6)$$

Если звено приведения совершает *поступательное* движение, то дифференциальное уравнение движения машинного агрегата будет иметь вид

$$m_n a_A + \frac{1}{2} V_A^2 \frac{dm_n}{ds} = F_n, \quad (7)$$

где m_n – приведенная масса; F_n – приведенная сила; ds – элементарное перемещение звена приведения; V_A и a_A – скорость и ускорение т. А звена приведения.

Дифференциальные уравнения движения (4)–(7) решаются графическим или численным методами (например, методом последовательных приближений).

Тема 8

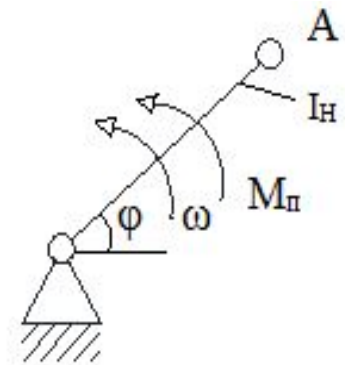
8.2. Графоаналитический метод исследования уравнений движения машинного агрегата

Аналитическое исследование уравнений движения машинного агрегата затруднено из-за *переменности* параметров: приведенной массы (момента инерции) и приведенных сил (моментов сил). В тоже время в большинстве практических задач движущие силы (моменты сил) или силы (моменты сил) сопротивления задаются виде *графически* – в виде механических характеристик двигателей или индикаторных диаграмм. Поэтому удобным и эффективным методом решения задач динамического анализа машинных агрегатов является графоаналитический метод.

Выбрав в качестве звена приведения кривошип, запишем уравнение движения машинного агрегата в энергетической форме

$$\frac{I_{II} \cdot \omega^2}{2} - \frac{I_{II0} \cdot \omega_0^2}{2} = \int_{\phi_0}^{\phi} (M_d - M_c) d\phi,$$

где M_d – приведенный момент движущих сил;
 M_c – приведенный момент сил сопротивления.



Тема 8

- Это уравнение позволяет определить зависимость угловой скорости ведущего звена от угла поворота $\omega(\varphi)$.

Как известно, процесс движения состоит из 3-х этапов: разбега, установившегося движения и выбега.

В период *разбега* работа движущих сил больше работы сил сопротивления,

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{д}} d\varphi > \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{с}} d\varphi,$$

в результате этого происходит увеличение скорости от нулевого до некоторого установившегося значения $\omega_{\text{ср}}$.

Во время *установившегося движения* работа движущих сил равна работе сил сопротивления

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{д}} d\varphi = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{с}} d\varphi$$

и приращения кинетической энергии не происходит. Следовательно, угловые скорости ведущего звена в начале и конце цикла одинаковы и равны $\omega_{\text{ср}}$.

Тема 8

- В период *выбега (торможения)*, после отключения двигателя ведущее звено будет двигаться за счет накопленного запаса кинетической энергии и работа движущих сил будет меньше работы сил сопротивления, обусловленных трением и специальными тормозными устройствами

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{д}} d\varphi < \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{с}} d\varphi,$$

в результате этого будет происходить уменьшение скорости от установившегося значения ($\omega_{\text{ср}}$) до нуля.

Для нахождения угловой скорости ведущего звена графоаналитическим способом должны быть известны: кинематическая схема механизма; геометрические и массовые характеристики подвижных звеньев; механические характеристики движущих сил (моментов сил) или сил (моментов сил) сопротивления и начальные условия движения. По этим исходным данным строится *диаграмма энергомасс*, устанавливающая зависимость кинетической энергии от приведенного момента инерции $T = f(I_{\text{п}})$. Эта диаграмма носит название *диаграммы Виттенбаура* (по имени немецкого ученого).

Тема 8

Порядок построения диаграммы Виттенбауэра

1. Задаются несколько (8, 12, 24 и более) положений ведущего звена и для этих положений вычисляются величины приведенных моментов движущих сил и сил сопротивления по формулам:

$$M_{\partial} = \sum_{i=1}^n (F_i V_i \cos \alpha_i / \omega + M_i \omega_i / \omega);$$

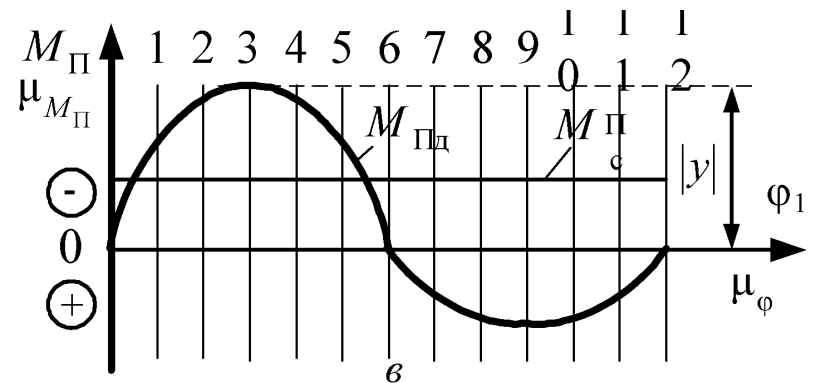
$$M_c = \sum_{i=1}^n (F_i V_i \cos \alpha_i / \omega + M_i \omega_i / \omega).$$

Эти моменты могут быть определены по индикаторным диаграммам, с помощью рычагов Жуковского.

2. Строятся графики изменения этих моментов в функции угла поворота φ_1 в выбранном масштабе

$$\mu_M = \frac{M_{\Pi \max}}{|y|},$$

здесь $M_{\Pi \max}$ – максимальное значение приведенного момента; $|y|$ – произвольно выбранный отрезок в мм, изображающий максимальное значение приведенного момента.



Тема 8

3. Путем графического интегрирования этих графиков строятся графики работ движущих моментов и моментов сопротивления: A_d (A_c).

$$A_d = \int_0^{\varphi} M_{Пд} d\varphi.$$

Масштабный коэффициент находится по формуле $\mu_A = \mu_M \cdot \mu_\varphi \cdot H$, где H – полюсное расстояние; μ_φ – масштабный коэффициент по оси абсцисс.

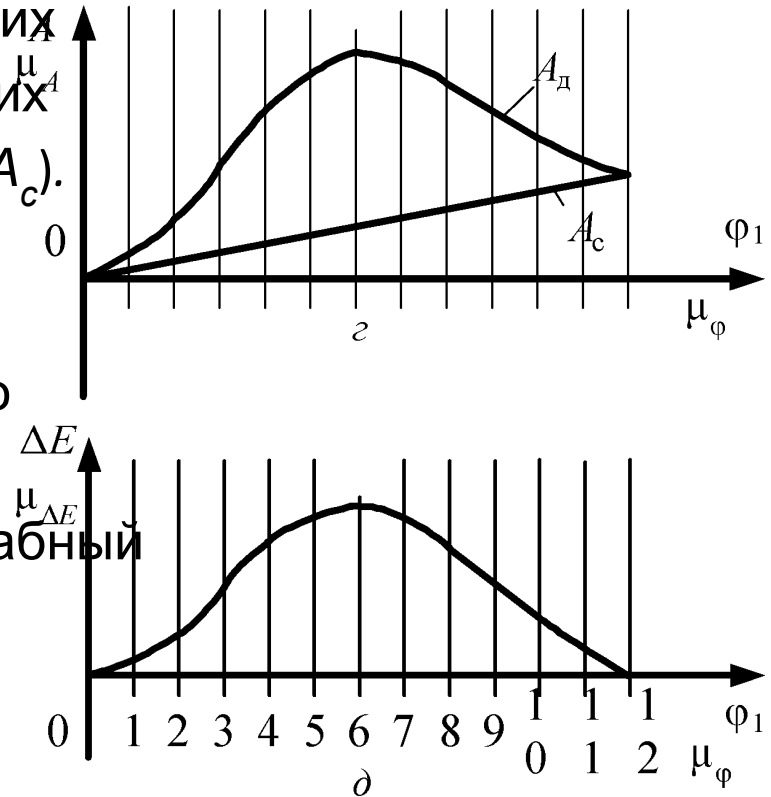
4. Находятся разности работ и строится график изменения кинетической энергии

$$\Delta E = A_d - A_c.$$

5. Выполняется приведение масс и моментов инерции звеньев для заданных положений ведущего звена

$$I_{II} = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\frac{V_{si}}{\omega} \right)^2 + I_{si} \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 \right].$$

Значения скоростей V_{si} можно определить с помощью планов скоростей.



Тема 8

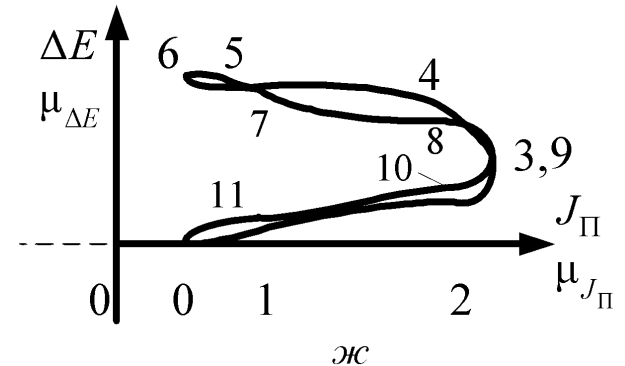
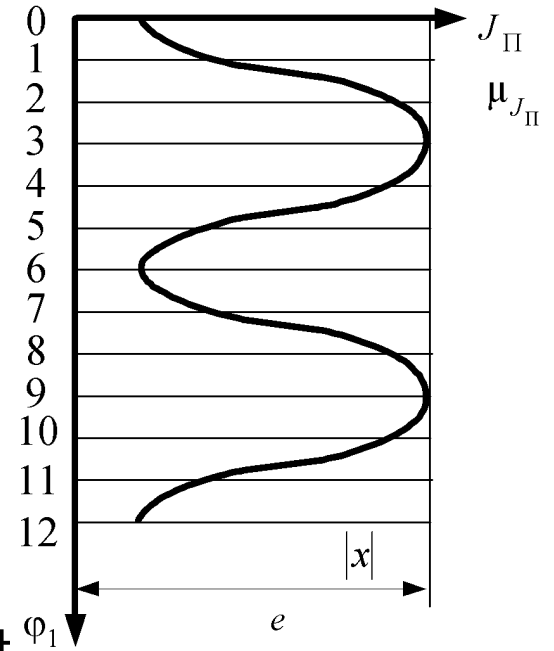
6. Строится график изменения приведенного момента инерции $J_{\Pi}(\varphi_1)$ в повернутой на 90° системе координат в выбранном масштабе

$$\mu_J = \frac{J_{\Pi \max}}{|x|},$$

где $J_{\Pi \max}$ – максимальное значение приведенного момента инерции; $|x|$ – произвольно выбранный отрезок в мм.

Поворот необходим для графического исключения угла поворота φ_1 и получения зависимости кинетической энергии от приведенного момента инерции.

7. Путем исключения параметра φ_1 строится кривая энергомасс $\Delta E = f(I_{\Pi})$ – **диаграмма Виттенбауэра**. Здесь $\mu_{\Delta E} = \mu_A$.



Тема 8

8.3. Построение диаграммы Виттенбауэра для установившегося движения

В качестве примера приведем рассмотрим построение диаграммы энергомаасс для установившегося движения машинного агрегата, т. е. за один поворот ведущего звена $\varphi=2\pi$. Предположим, что приведенный момент движущих сил, определяемой характеристикой двигателя, *постоянный*: $M_\partial=const$. Приведенный момент сил сопротивления является *переменной* величиной и зависит от угла поворота φ , согласно механической характеристики. Тогда уравнение энергетического баланса запишется в виде:

$$M_\partial 2\pi - \int_0^{2\pi} M_c d\varphi = 0.$$

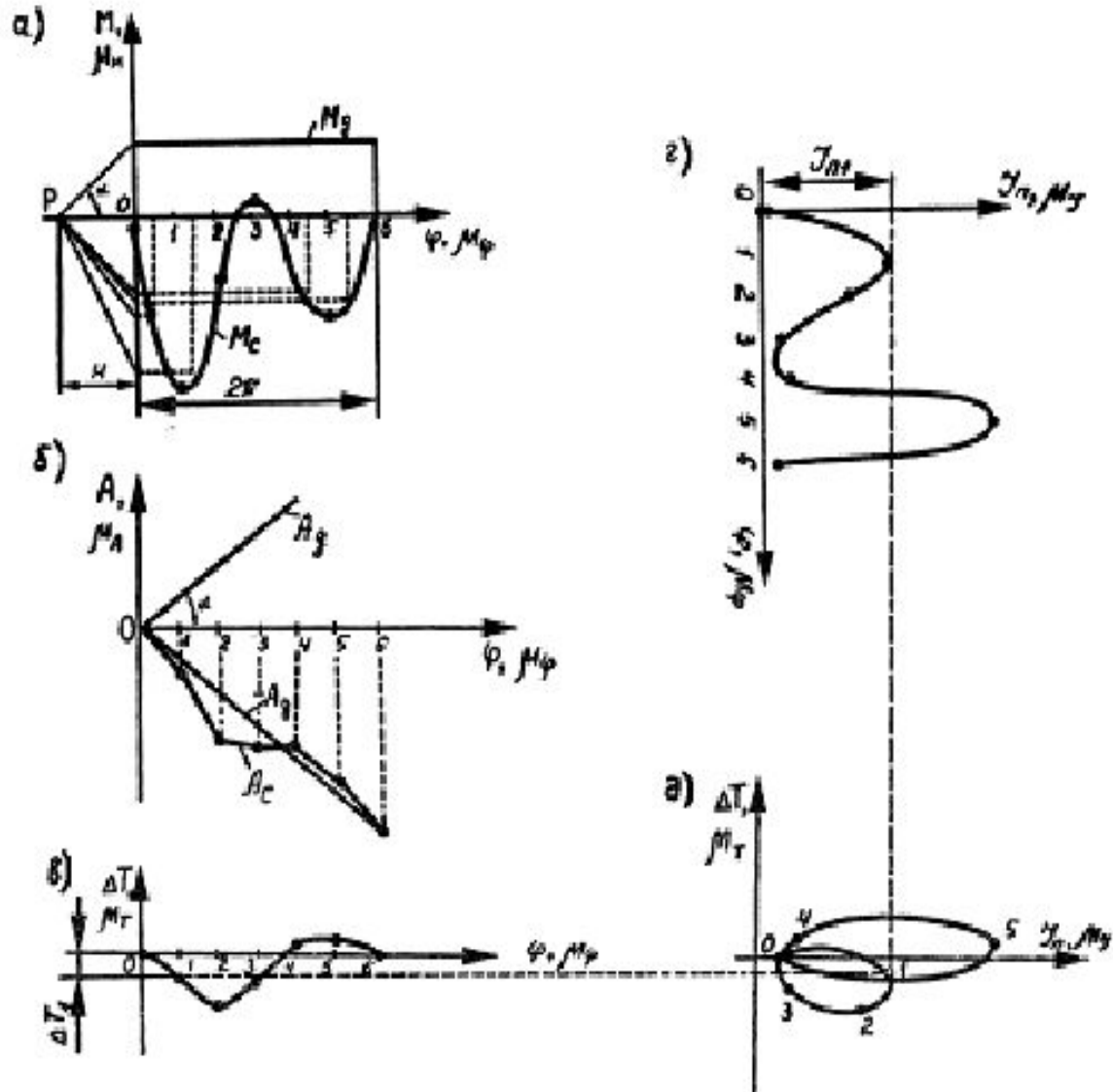
Согласно геометрического смысла интеграла площадь, ограниченная кривой $M_c(\varphi)$ и осью абсцисс, должна быть равна площади прямоугольника со сторонами M_∂ и 2π .

1. Задаемся 6-ю положениями ведущего звена и вычисляем значение приведенного момента сил сопротивления M_c для этих положений по механической характеристике или с помощью рычагов Жуковского.

2. В выбранном масштабе μ_M строим график приведенного момента сил сопротивления в функции угла поворота ведущего звена $M_c(\varphi)$ (рис. а).

Тема 8

Расположение графиков



Тема 8

- Определяем масштабный коэффициент оси абсцисс

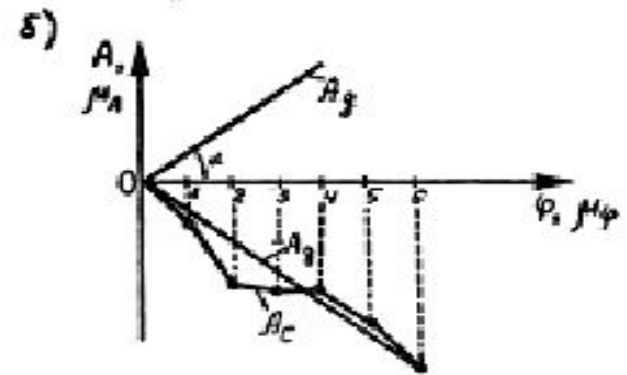
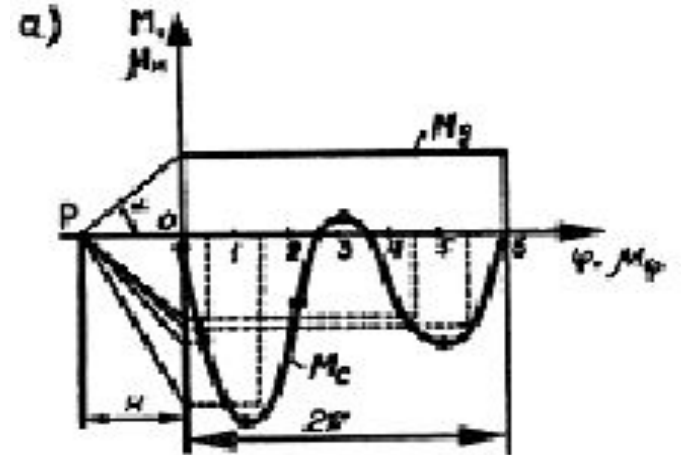
$$\mu_\phi = \frac{2\pi}{L},$$

где L – отрезок в мм, изображающий полный поворот ведущего звена.

3. Задавшись полюсным расстоянием H , выбираем полюс P . Сносим точки кривой $M_c(\phi)$, соответствующие серединам интервалов оси абсцисс, на ось ординат и соединяем полученные точки пересечения с полюсом P .

4. В новой системе координат (см. рис. б), которую располагаем ниже графика $M_c(\phi)$

и ось абсцисс которой также разделяем на 6 равных участков в пределах соответствующих интервалов оси абсцисс проводим прямые, параллельные лучам, исходящим из полюса P . В результате получается график работ сил сопротивления A_c с масштабным коэффициентом, равным $\mu_A = \mu_M \cdot \mu_\phi \cdot H$.



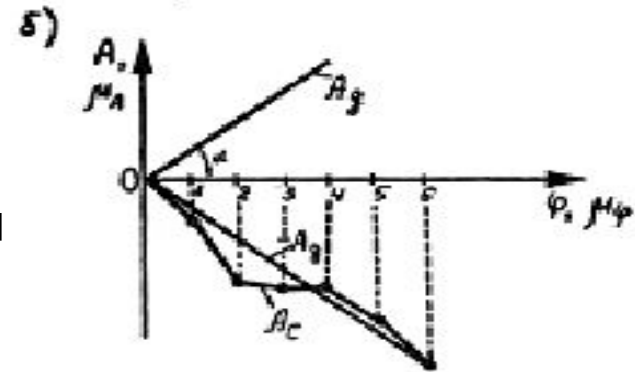
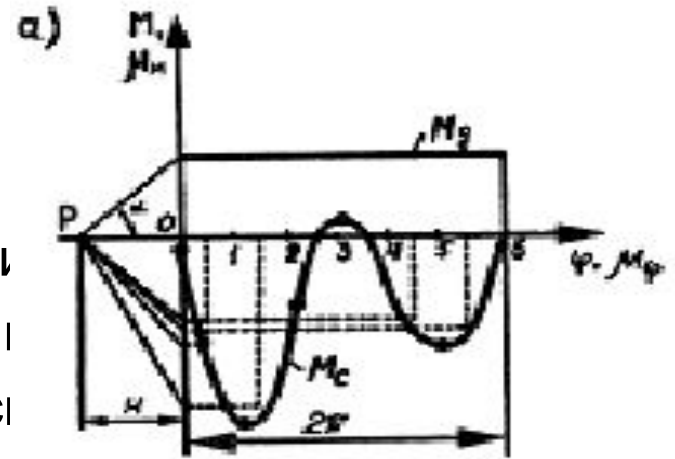
Тема 8

5. Строим график работ движущих сил и определяем величину постоянного момента движущих сил M_{∂} .

Так как величины работ движущих сил A_{∂} и сил сопротивления A_c в начале и конце цикла равны, а значение приведенного момента движущих сил не изменяется на протяжении цикла, для построения графика работ движущих сил необходимо соединить прямой начальную и конечную точки кривой работ сил сопротивления

$$A_{\partial} = \int_0^{\phi} M_c d\phi = M_{\partial} 2\pi.$$

В результате получаем график работ движущих сил с обратным знаком ($-A_{\partial}$) (см. рис. б). Построив график $(+A_{\partial})$, находим угол α . Из полюса P (см. рис. а) под углом α проводим луч, точка пересечения которого с осью ординат определит величину постоянного момента движущих сил M_{∂} .



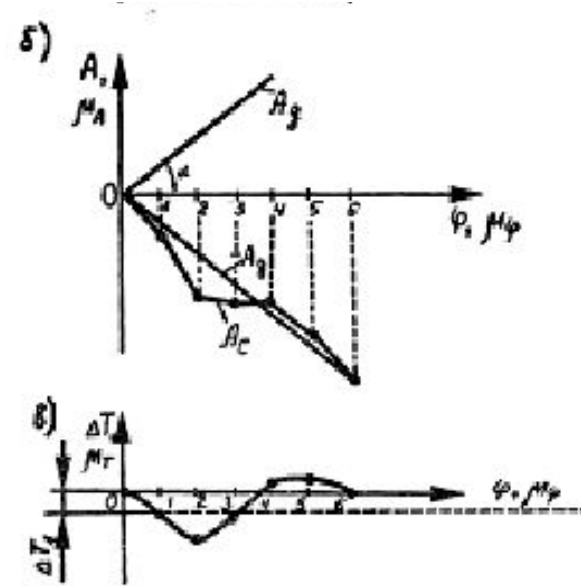
Тема 8

6. Находим разность работ ($A_o - A_c$) для каждого положения ведущего звена (см. рис. б) и строим график изменения кинетической энергии $\Delta T = A_o - A_c$ (см. рис. в). Масштабный коэффициент $\mu_T = \mu_A$.

7. Выполняем приведение масс и моментов инерции звеньев и определяем величины приведенных моментов инерции J_{Γ} для каждого положения ведущего звена (см. рис. г).

8. В повернутой на 90° системе координат в выбранном масштабе μ , строим график приведенных моментов инерции J_{Γ} (см. рис. г).

9. Путем графического исключения параметра φ строим **диаграмму Виттенбаура**: $\Delta T = f(J_{\Gamma})$ (см. рис. д):



Тема 8

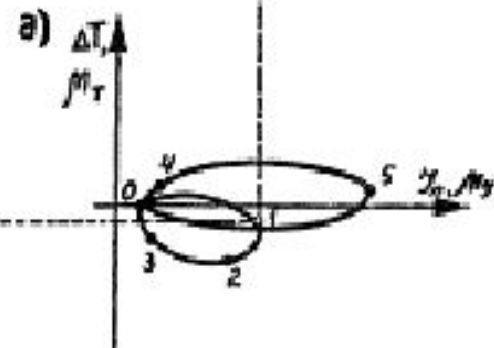
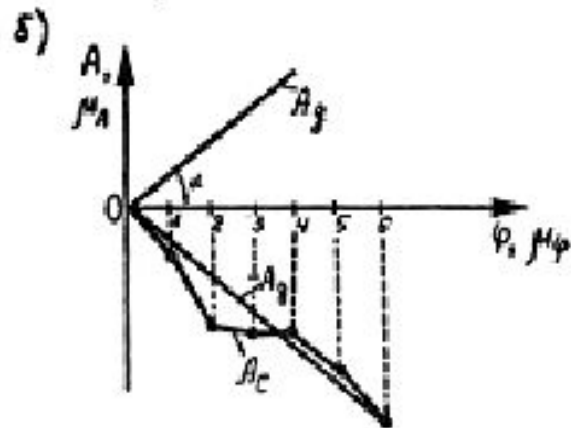
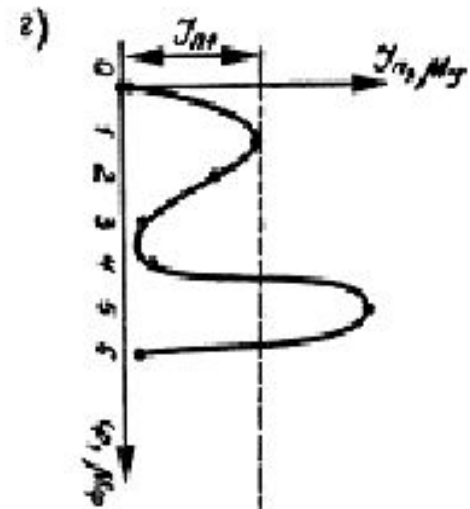
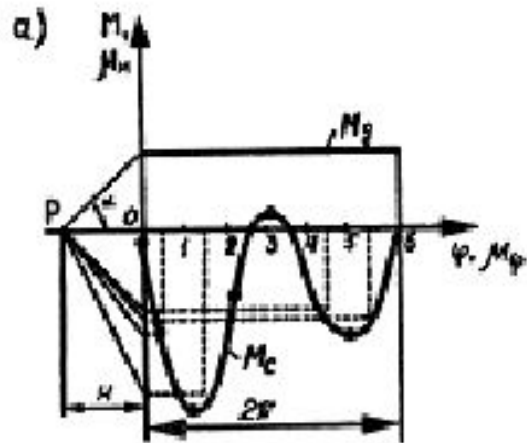
Порядок построения диаграммы $\Delta T = f(J_{\Gamma})$

- 1) Для угла $\varphi = \varphi_1$ отмечается значение Jn_1 и проводится вертикальная прямая;
- 2) Для этого же значения угла φ_1 отмечается значение ΔT_1 и проводится горизонтальная прямая;
- 3) В пересечении этих прямых получаем точку 1;
- 4) Повторяем построение для всех положений угла ($\varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_6$);
- 5) Полученные точки соединяем плавной кривой.

В установившемся режиме эта кривая должна быть *замкнутой*.

Тема 8

Построение диаграммы Виттенбауэра



Тема 8

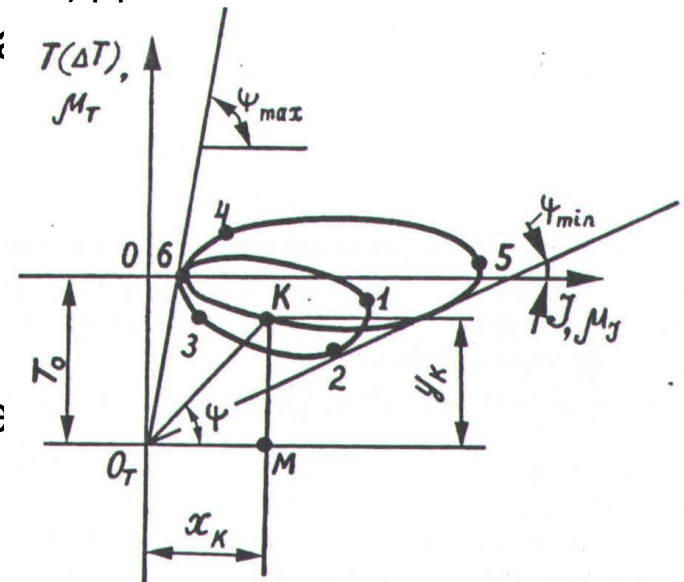
8.4. Определение закона движения начального звена

Полученная выше кривая Виттенбауэра позволяет определить закон движения начального звена, т.е. решить прямую задачу динамики.

В момент пуска или остановки машины, т.е. при $\omega = 0$, её кинетическая энергия равна нулю. В установившемся режиме каждому циклу движения машинного агрегата соответствует полный ход точки по замкнутой кривой. При этом кинетическая энергия звена приведения, не будет равна нулю, так как угловые скорости в начале и конце одного цикла равны некоторому среднему значению $\omega_{ср}$.

Так как $\Delta T = T - T_0$, то $T = \Delta T + T_0$. Таким образом, действительное начало координат будет находиться в точке O_T , которая смещена от начала координат диаграммы Виттенбауэра на величину T_0 (см. рис.).

Если соединить начало координат O , с любой точкой на диаграмме (например, K), то получим угол ψ , образованный этой секущей и осью абсцисс.



Тема 8

- Этот угол позволяет определить **угловую скорость** начального звена в любом положении.

Из треугольника O_1KM следует:

$$\operatorname{tg} \psi = Y_K / X_K.$$

Так как $Y_K = T / \mu_T$; $X_K = J_{\Pi} / \mu_J$, то

$$\operatorname{tg} \psi = T \mu_J / J_{\Pi} \mu_T.$$

С учетом того, что $T = J_{\Pi} \omega^2 / 2$, получим

$$\operatorname{tg} \psi = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega^2.$$

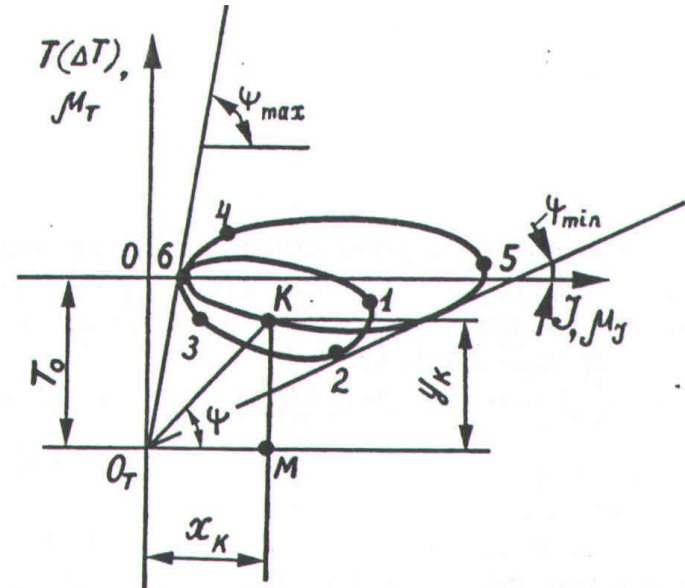
Отсюда можно найти угловую скорость

$$\omega = \sqrt{2 \mu_T \operatorname{tg} \psi / \mu_J}.$$

Наибольшее и наименьшее значения угол ψ принимает в том случае, когда секущая прямая превращается в касательную. При этом значения угловой скорости:

$$\omega_{\max} = \sqrt{2 \mu_T \operatorname{tg} \psi_{\max} / \mu_J};$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{2 \mu_T \operatorname{tg} \psi_{\min} / \mu_J}.$$



Тема 8

- **8.5. Определение параметров маховика по заданному коэффициенту неравномерности хода**

Как следует из диаграммы Виттенбауэра, угловая скорость начального звена изменяется от минимального до максимального значений, которые определяют неравномерное движение машинного агрегата, характеризуемого *коэффициентом неравномерности хода*

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{cp}}, \quad (1)$$

где ω_{min} , ω_{max} – минимальное и максимальное значения скорости; ω_{cp} – среднее значение скорости ведущего звена.

Поскольку колебания скорости полностью устранить нельзя, их необходимо *ограничить*. Другими словами, нужно сделать коэффициент неравномерности хода как можно малым.

Для того, чтобы уменьшить коэффициент неравномерности хода необходимо увеличить инерционные свойства машинного агрегата. Этого можно добиться путем установки на приводном валу дополнительной массы, которая называется *маховиком*. Маховик является как бы аккумулятором кинетической энергии машинного агрегата, накапливая её во время ускоренного движения и отдавая при замедленном движении.

Тема 8

В случаях, когда установка на приводном валу маховика невозможна по конструктивным или иным соображениям, для реализации его функций можно использовать уже существующие в структуре машинного агрегата звенья, совершающие вращательные движения: ротор энергетической машины, соединительные муфты, зубчатые колеса, кулачки, шкивы, звездочки и т.п.

Основное назначение маховика состоит в ограничении колебаний угловой скорости приводного вала в пределах, определяемых *заданным* коэффициентом неравномерности хода.

Определение момента инерции маховика проводится в процессе проектирования машинного агрегата и составляет одну из задач его *динамического синтеза*.

Эффективным методом решения этой задачи является использование диаграммы Виттенбауэра. Касательные, проведенные к этой диаграмме и соответствующие допустимым для заданного коэффициента неравномерности хода значениям максимальной и минимальной угловой скорости ведущего звена, позволяют определить величину необходимого момента инерции маховика.

Тема 8

- Поскольку коэффициент неравномерности хода малая величина, значение средней скорости ведущего звена можно принять равной среднему арифметическому его максимальной и минимальной скоростей

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{cp}}}. \quad (2)$$

Решим совместно уравнения (1) и (2). Из (1)

$$\omega_{\max} - \omega_{\min} = \delta \omega_{\text{cp}}. \quad (3)$$

Из (2)

$$\omega_{\max} + \omega_{\min} = 2 \omega_{\text{cp}}. \quad (4)$$

Складывая (3) и (4), получим

$$\omega_{\max} = \omega_{\text{cp}} (1 + \delta/2). \quad (5)$$

Складывая (3) и (4), найдем

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{cp}} (1 - \delta/2). \quad (6)$$

Определим величины максимальных и минимальных углов наклона

$$\text{tg } \psi_{\max} = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega_{\max}^2;$$

$$\text{tg } \psi_{\min} = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega_{\min}^2.$$

С учетом (5) получим $\text{tg } \psi_{\max} = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega_{\text{cp}}^2 (1 + \delta + \delta^2 / 4).$

Тема 8

- Последним слагаемым в скобке, как членом второго порядка малости, можно пренебречь. Тогда

$$\operatorname{tg} \psi_{\max} = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega_{\text{cp}}^2 (1 + \delta). \quad (7)$$

Аналогично будем иметь

$$\operatorname{tg} \psi_{\min} = (\mu_J / 2 \mu_T) \omega_{\text{cp}}^2 (1 - \delta). \quad (8)$$

С помощью выражений (7) и (8) по заданным значениям коэффициента неравномерности хода δ и средней скорости ω_{cp} можно найти значения допустимых углов наклона касательных к диаграмме Виттенбауэра.

