

Олимпиада «Физтех.Инженер». 2 марта 2024 года

11 класс. Заключительный тур

Вариант 1

Задача 1. Электродвигатель постоянного тока, ШИМ-сигнал

«Правильное» питание для мотора

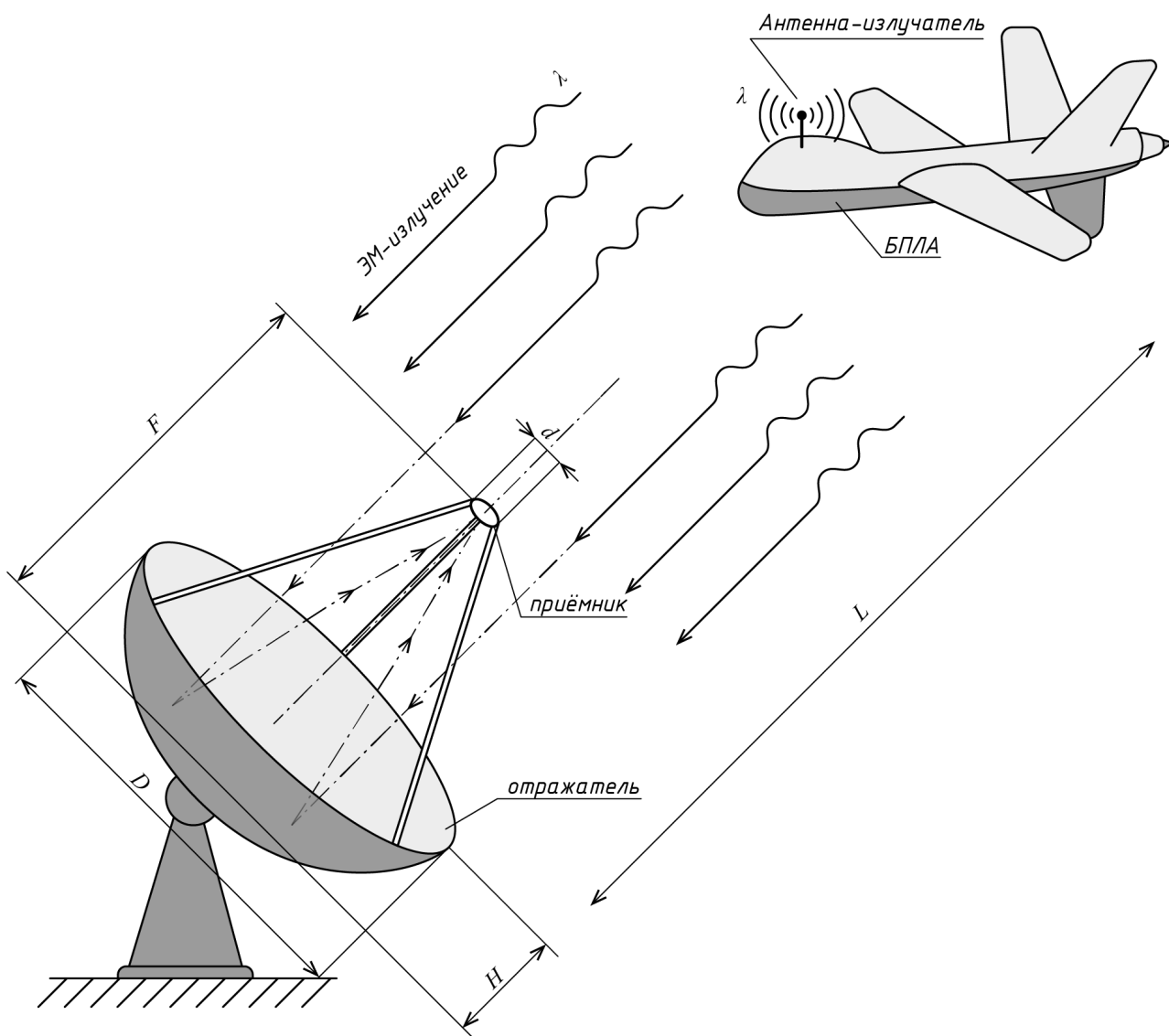
Широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) часто применяют для управления мощностью инерционных устройств. Питание устройств осуществляют последовательностью импульсов (прямоугольных). При этом эффективная мощность устройства пропорциональна скважности (отношение длительности импульсов к периоду их повторения) ШИМ-сигнала.

Вал электродвигателя постоянного тока после подключения к источнику питания через некоторое время начинает вращаться с постоянной частотой $n_0 = 50 \text{ мин}^{-1}$. Электродвигатель подключили к тому же источнику через электронный ключ (силовой транзистор), управляемый с микроконтроллера сигналом с широтно-импульсной модуляцией. Считая, что момент сил трения, действующий на ротор, пропорционален частоте вращения $M_{\text{тр}} = an + b$, определить частоту вращения вала n_1 при скважности ШИМ-сигнала 0,5. Момент сил на валу заклинившего двигателя (двигатель подключен к источнику, но вал не вращается из-за действия внешних сил) равен $M_0 = 2 \text{ кН}\cdot\text{м}$. $a = 20 \text{ Вт}$, $b = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Ротор электродвигателя многополюсный, а статор — постоянные магниты.

Задача 2. Параболическая антенна

Параболоид инженера Гарина

Отражатель антенны в виде параболоида вращения (коэффициент отражения его поверхности по амплитуде $R_a = 70\%$) диаметром $D = 1 \text{ м}$ и глубиной $H = 3 \text{ см}$ принимает сигнал ЭМ-волн на длине волны $\lambda = 1 \text{ см}$. Непрерывный ЭМ-сигнал приходит к антенне от всеракурсного излучателя БПЛА мощностью $N = 1 \text{ Вт}$. БПЛА барражирует на расстоянии $L = 10 \text{ км}$ от антенного поста. Считать, что потерями в атмосфере можно пренебречь. Учесть известный факт волновой оптики, что параллельные лучи ЭМ-излучения с длиной волны λ , падающие нормально на плоское круглое зеркало диаметра $A \gg \lambda$, из-за дифракции формируют при отражении слаборасходящийся усеченный конус излучения с половинным углом при вершине (с углом полураствора) $\alpha \approx 1,22\lambda/A$. Дифракцией прямого падающего излучения на приемнике и на растяжках, удерживающих его на оси параболоида, можно пренебречь, как и «затенением» отражателя параболоида.



А) Сигнал какой максимальной мощности (осредненной по времени) падает на антенну в этом случае? Антенна может поворачиваться и менять направление на источник излучения.

Б) В геометрическом приближении нормальный пучок электромагнитных лучей после отражения от антенны собирается в одной точке фокуса. Доказать, что фокусное расстояние параболоида вращения, отсчитываемое вдоль оси вращения от самой глубокой его точки, вычисляется по формуле $F = D^2/16H$. Чему оно равно?

В) Оценить минимальный диаметр дискового приемника антенны d , расположенного на ее оси, необходимый для достижения максимальной дальности приема.

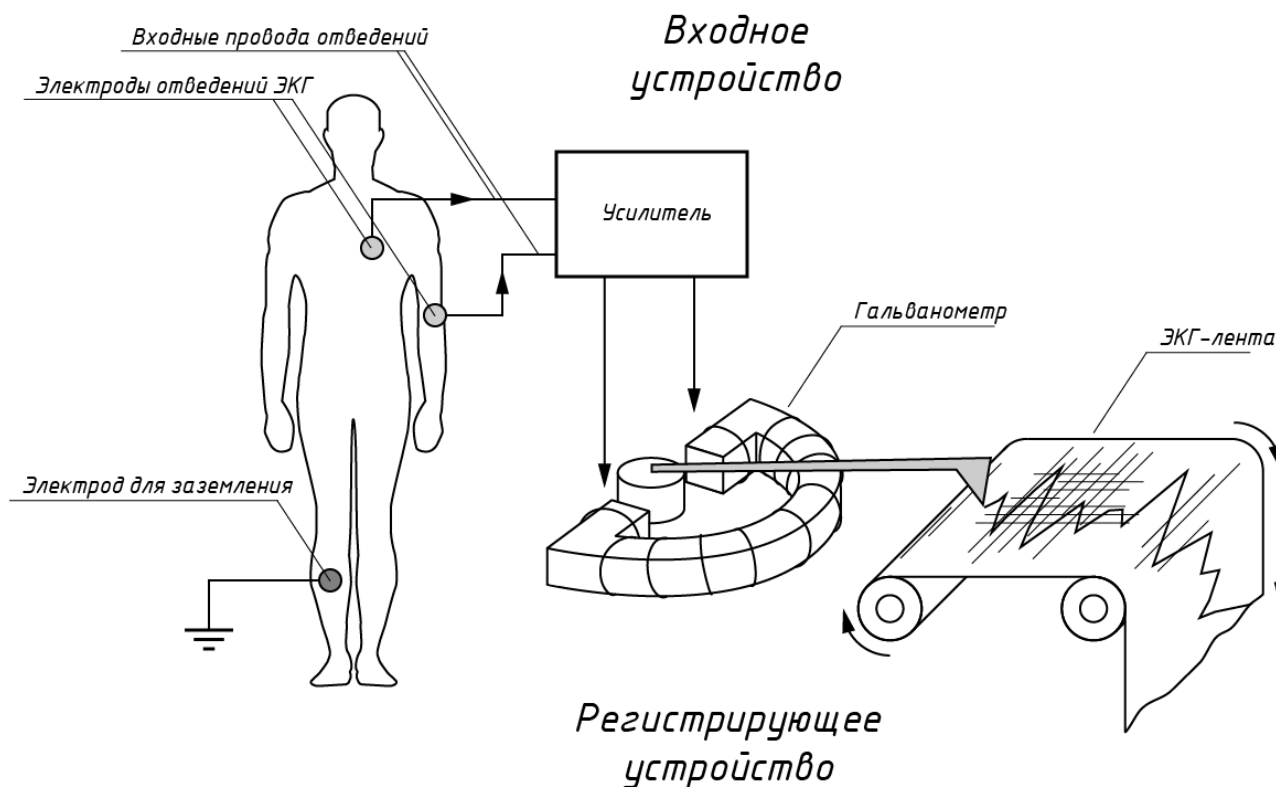
Г) Оценить эффективную напряженность E от сигнала данного БПЛА на таком приемнике.

Задача 3. Электрокардиография

«Кардиоконденсатор»

Для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний применяют метод электрокардиографии, записывая и расшифровывая электрический сигнал, пропорциональный ЭДС, индуцируемой сердечной активностью человека между определенными точками тела. Пусть ЭДС между некоторыми точками генерируется в виде очень коротких редко следующих друг за другом

импульсов длительностью $\tau = 0,5$ мс и максимальным значением ЭДС $E = 20$ мВ. К электрокардиографу с входным сопротивлением $R_0 = 50$ Ом проводниками присоединены два электрода, которые наложены на кожу пациента над точками тела, между которыми измеряют ЭДС. Можно считать, что электроды, отделенные от внутренней среды организма слоем кожи сопротивлением $R = 600$ кОм, составляют с ней конденсаторы емкостью $C = 10$ пФ. Определить максимальное падение напряжения U на приборе. Считать, что сопротивление внутренней среды организма равно $r = 400$ Ом.



А) При наложении электродов кожу смазывают гелем. Для чего? Высказать свои обоснованные предположения.

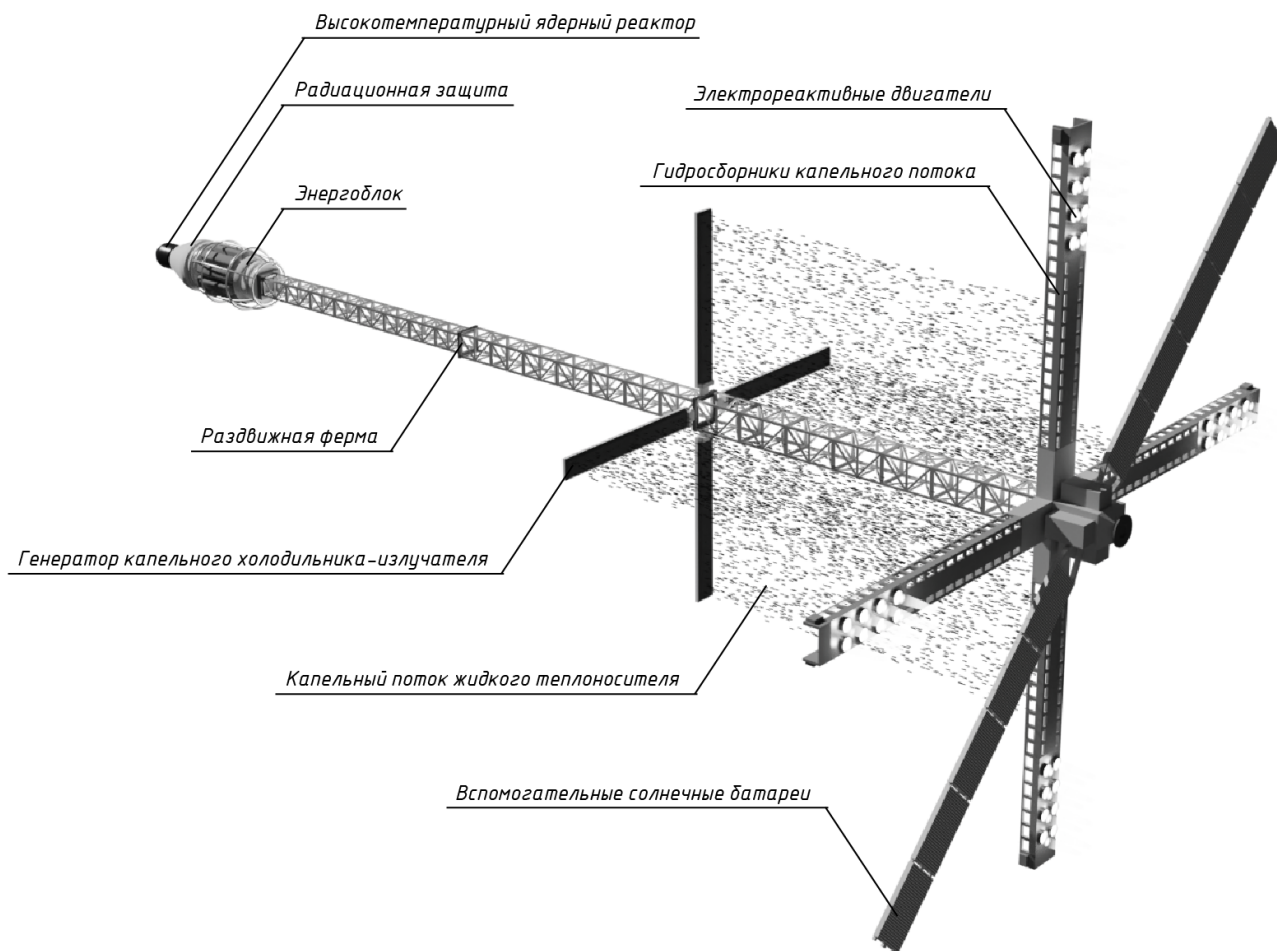
Б) Электрический сигнал в сердечных волокнах образуется из-за конкуренции диффузионных потоков ионов Na^- и K^+ через клеточную мембрану. Диффузия в жидкостях медленная. Почему тогда импульсы на кардиограмме столь короткие?

Задача 4. Космический буксир

Через тернии к звездам!

В проекте ТЭМ (транспортно-энергетического модуля) предлагается использовать электрореактивный двигатель с ядерным реактором. Для нормальной работы реактора необходимо его эффективное охлаждение с большим теплоотводом, что в космосе проблематично. Один из способов утилизации тепла — жидкокапельное охлаждение. Нагретое жидкое олово (в качестве теплоносителя в охлаждающем контуре реактора) разбивают на капли радиуса $R = 11,25$ мкм вне герметичного отсека. Капли излучают тепло, пролетая в космическом пространстве от разбрызгивателя до специального приемника. Потом они собираются на приемнике и снова поступают в контур охлаждения двигателя. Считать каплю абсолютно черным телом, излучающим тепло при температуре T по закону Стефана-

Больцмана с интенсивностью ($\text{Вт}/\text{м}^2$) $J = \sigma_s T^4$, причем максимум излучения приходится на частоту электромагнитных волн $\nu = bT$. Здесь $\sigma_s = 56,7 \text{ нВт}/\text{м}^2\text{К}^4$, $b = 1,04 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}\text{К}^{-1}$. Считать, что капля олова излучает уединенно, находясь в расплавленном состоянии. Температуры плавления и конденсации олова соответственно равны 232°C и 2620°C , а теплоемкость и плотность жидкого олова — $270 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$ и $7000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

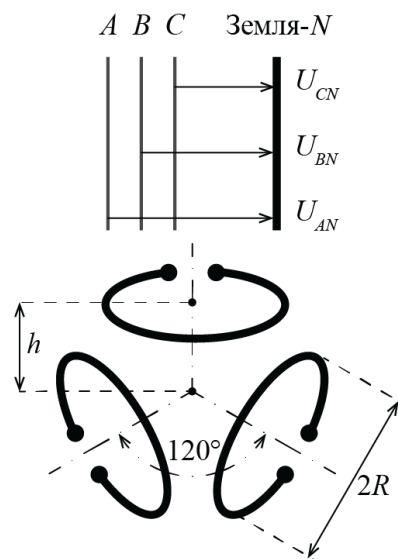


- А) Обосновать, почему в космосе охлаждение реактора является большой проблемой.
- Б) Оценить минимальные затраты мощности на образование таких капель, если рассеиваемая с их помощью тепловая мощность равна $P = 3 \text{ МВт}$, а коэффициент поверхностного натяжения жидкого олова $\sigma = 1 \text{ Н}/\text{м}$. Потери мощности на вязкое трение в процессе дробления не учитывать.
- В) Космический инфракрасный (ИК)-телескоп следит за транспортно-энергетическим модулем с ракурса, с которого маршевые двигатели ТЭМ затенены элементами конструкции, а капли теплоносителя не затенены. Оценить диапазон длин волн, на которых проще всего обнаружить ТЭМ. Считать, что телескоп и буксир неподвижны друг относительно друга.
- Г) При каких маневрах ТЭМ теплоноситель будет теряться в космическое пространство (пролетать мимо приемника капель)? При каких — не будет?

Задача 5. Электродвигатель переменного тока

Между звездой и треугольником

У асинхронных и синхронных трехфазных электродвигателей, используемых в импеллерах силовых установок электросамолетов, как правило, есть неподвижный статор, который создает внутри себя вращающееся магнитное поле. Это поле приводит во вращение ротор, находящийся внутри статора. Рассмотрим упрощенную модель статора (на рисунке статор показан без ротора), который образован тремя кольцами радиуса $R = 3$ см, сопротивлением $r = 32$ кОм каждое. Их оси лежат в плоскости рисунка под углом 120° друг к другу. Их центры удалены на $h = 4$ см от оси статора.



Межфазные (линейные) напряжения трехфазной цепи имеют вид: $U_{AB,BC,CA} = U_m \cos(2\pi vt + \varphi_0)$ с $U_m = 220$ В, $\nu = 50$ Гц и с разными начальными фазовыми углами φ_0 . На клеммы колец подают фазовые напряжения U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} так, что индукция B любого кольца при $\varphi_0 = 0$ и $t = 0$ направлена к оси генератора. В случае $\varphi_0 = 0$ (U_{AN}), $\varphi_0 = 2\pi/3$ (U_{BN}), $\varphi_0 = 4\pi/3$ (U_{CN}) на оси генератора создается равномерно вращающееся, постоянное по модулю поле B_s .

А) Найти с помощью векторных диаграмм амплитуды напряжений на кольцах и их линейные частоты колебаний.

Б) Рассчитать амплитуду магнитного поля в центре статора от одного из колец радиуса R , по которому течет ток I , по формуле $B = \mu_0 I R^2 / 2L^3$, где L — расстояние от точки на кольце до центра статора.

В) Найти частоту вращения и модуль суммарного магнитного поля на оси статора B_s .

Г) Пусть ротор представляет собой плоскую короткозамкнутую кольцевую катушку из жесткой алюминиевой проволоки. Диаметр катушки совпадает с осью вращения магнитного поля. Ротор может вращаться вдоль этой оси (вдоль своего диаметра) практически без трения. Когда вращение ротора стабилизируется, то с какой частотой он будет вращаться: больше, меньше или равной частоте вращения магнитного поля? Объяснить, почему.

Задача 6. Эксцентричный барабан

Основной частью стиральной машины является металлический барабан — цилиндр с множеством отверстий, открытый с одного торца и способный вращаться вокруг горизонтальной оси. При вращении барабана помещенные в него предметы перемещаются относительно друг с друга, соприкасаясь друг с другом. В присутствии моющего средства это приводит к их очищению от загрязнений. В режиме отжима барабан, вращаясь с большой скоростью, выжимает из стираемых вещей воду, которая отводится через отверстия в его стенке. Случается, что если вещи распределены неравномерно, то они собираются в один ком. Это приводит к тому, что при отжиме стиральная машина может начать подпрыгивать, отрываясь от поверхности пола.

Допустим, в стиральную машину массой $M = 50$ кг загрузили белье массой $m = 5$ кг. При отжиме собрался компактный ком, центр масс которого находится на расстоянии $r = 10$ см от оси вращения. Частота вращения барабана $n = 1200$ мин⁻¹. Считая ось барабана жестко закрепленной относительно корпуса машины, а ее ножки не имеющими амортизаторов (упругих элементов), определить:

1. Высоту h , на которой находится центр масс комка относительно уровня оси вращения барабана, при отрыве машины от пола.
2. Максимальную высоту H , на которую будет подпрыгивать машина (подниматься центр масс машины).

А) Объяснить, как амортизаторы ножек позволяют уменьшить подобные вибрации.

Б) Может ли при таких вибрациях машина смещаться в горизонтальном направлении? Ответ пояснить.

Олимпиада «Физтех.Инженер». 2 марта 2024 года

11 класс. Заключительный тур

Вариант 2

Задача 1. Электродвигатель постоянного тока, ШИМ-сигнал

«Правильное» питание для мотора

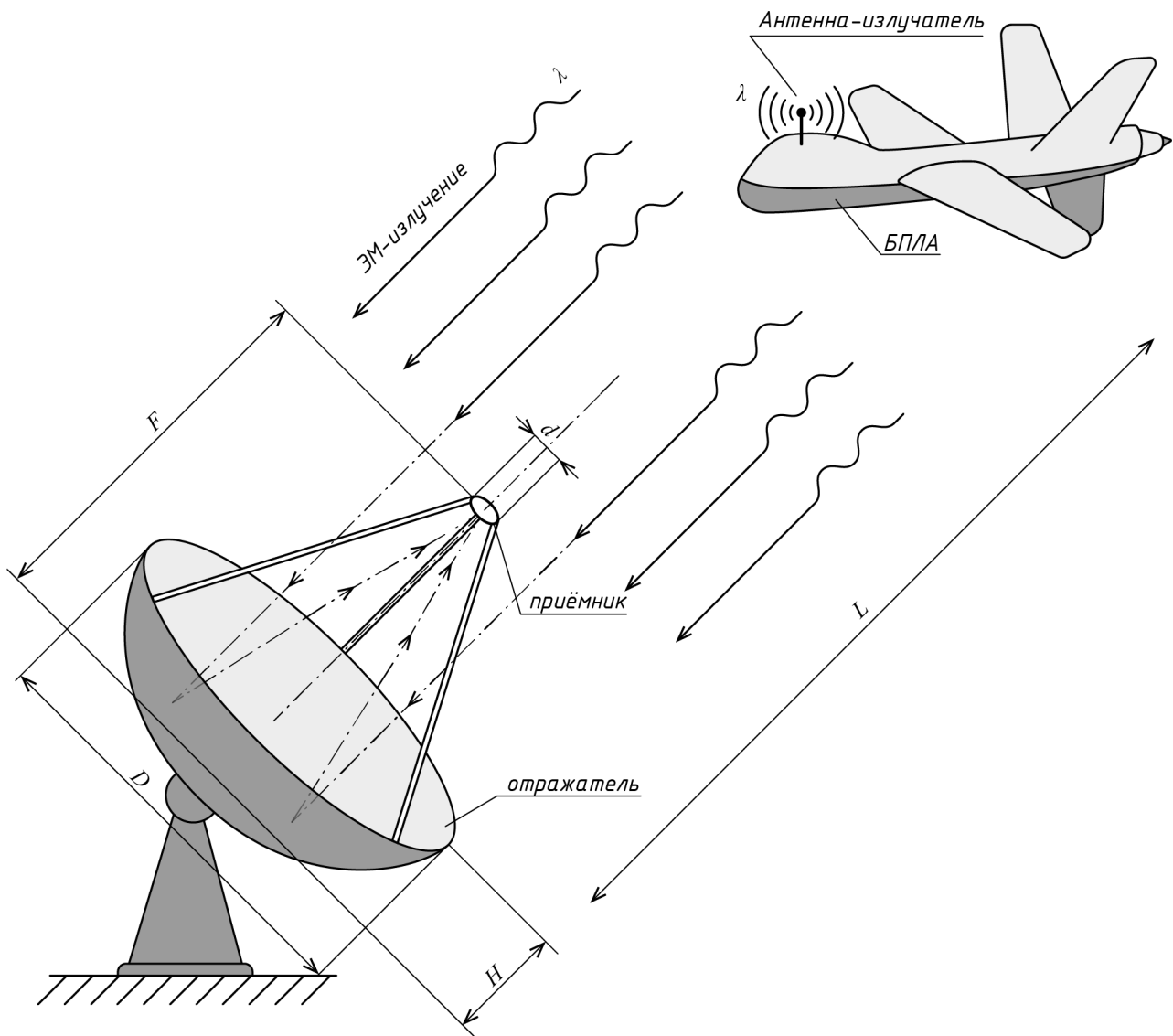
Широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) часто применяют для управления мощностью инерционных устройств. Питание устройств осуществляют последовательностью импульсов (прямоугольных). При этом эффективная мощность устройства пропорциональна скважности (отношение длительности импульсов к периоду их повторения) ШИМ-сигнала.

Вал электродвигателя постоянного тока после подключения к источнику питания через некоторое время начинает вращаться с постоянной частотой $n_0 = 20 \text{ мин}^{-1}$. Электродвигатель подключили к тому же источнику через электронный ключ (силовой транзистор), управляемый с микроконтроллера сигналом с широтно-импульсной модуляцией со скважностью 0,3. При этом вал стал вращаться с частотой $n_1 = 5 \text{ мин}^{-1}$. Считая, что момент сил трения, действующий на ротор, пропорционален частоте вращения $M_{\text{тр}} = an + b$, определить, чему равен момент сил на валу заклинившего двигателя M_0 (двигатель подключен к источнику, но вал не вращается из-за действия внешних сил), если $a = 20 \text{ Вт}$, $b = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Ротор электродвигателя многополюсный, а статор — постоянные магниты.

Задача 2. Параболическая антенна

Параболоид инженера Гарина

Отражатель антенны в виде параболоида вращения (100% отражение) диаметром $D = 1 \text{ м}$ и глубиной $H = 10 \text{ см}$ принимает сигнал ЭМ-волн на длине волны $\lambda = 1 \text{ см}$. ЭМ-сигнал длительностью $\tau = 10 \text{ мс}$ приходит к антенне от всеракурсного излучателя БПЛА с энергией в импульсе $W = 0,01 \text{ Дж}$. БПЛА барражирует на расстоянии $L = 10 \text{ км}$ от антенного поста. Считать, что потерями в атмосфере можно пренебречь. Учесть известный факт волновой оптики, что параллельные лучи ЭМ-излучения с длиной волны λ , падающие нормально на плоское круглое зеркало диаметра $A \gg \lambda$, из-за дифракции формируют при отражении расходящийся усеченный конус излучения с половинным углом при вершине (с углом полураствора) $\alpha \approx 1,22\lambda/A$. Дифракцией прямого падающего излучения на приемнике и на растяжках, удерживающих его на оси параболоида, можно пренебречь, как и «затенением» отражателя параболоида.



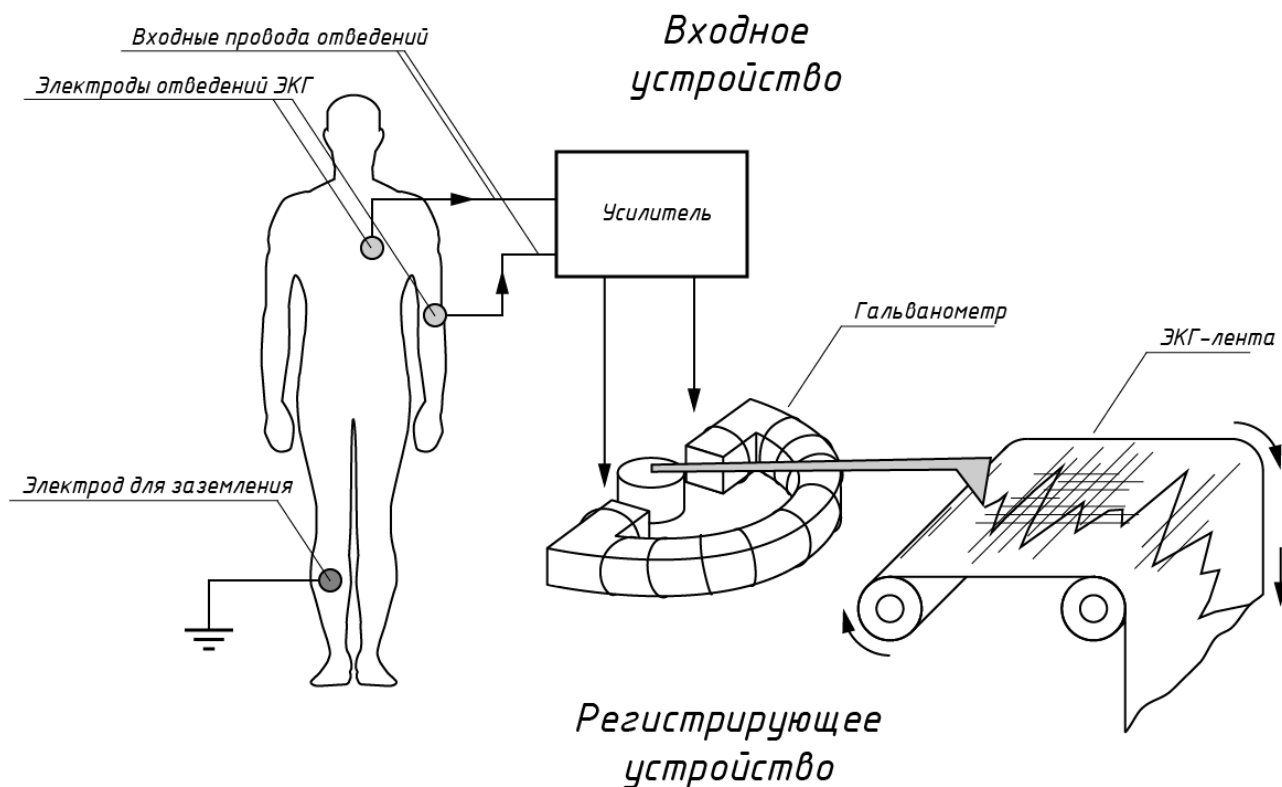
- А) Сигнал какой максимальной интенсивности падает на отражатель антенны в этом случае?
- Б) В геометрическом приближении нормальный пучок электромагнитных лучей после отражения от антенны собирается в одной точке фокуса. Доказать, что фокусное расстояние параболоида вращения, отсчитываемое вдоль оси вращения от самой глубокой его точки, вычисляется по формуле $F = D^2/16H$. Чему оно равно?
- В) Оценить минимальный диаметр круглого приемника антенны d , расположенного на оси симметрии параболоида, для достижения максимальной дальности приема.
- Г) Оценить эффективную величину магнитной индукции B от сигнала данного БПЛА на таком приемнике.

Задача 3. Электрокардиография

«Кардиоконденсатор»

Для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний применяют метод электрокардиографии, записывая и расшифровывая электрический сигнал, пропорциональный ЭДС, индуцируемой сердечной активностью человека между определенными точками тела. Пусть ЭДС между некоторыми точками генерируется в виде очень коротких редко следующих друг за другом

импульсов длительностью $\tau = 0,3$ мс и максимальным значением ЭДС $E = 10$ мВ. К электрокардиографу с входным сопротивлением $R_0 = 120$ Ом проводниками присоединены два электрода, которые наложены на кожу пациента над точками тела, между которыми измеряют ЭДС. Можно считать, что электроды, отделенные от внутренней среды организма слоем кожи сопротивлением $R = 600$ кОм, составляют с ней конденсаторы емкостью $C = 30$ пФ. Определить максимальное падение напряжения U на приборе. Считать, что сопротивление внутренней среды организма равно $r = 500$ Ом.



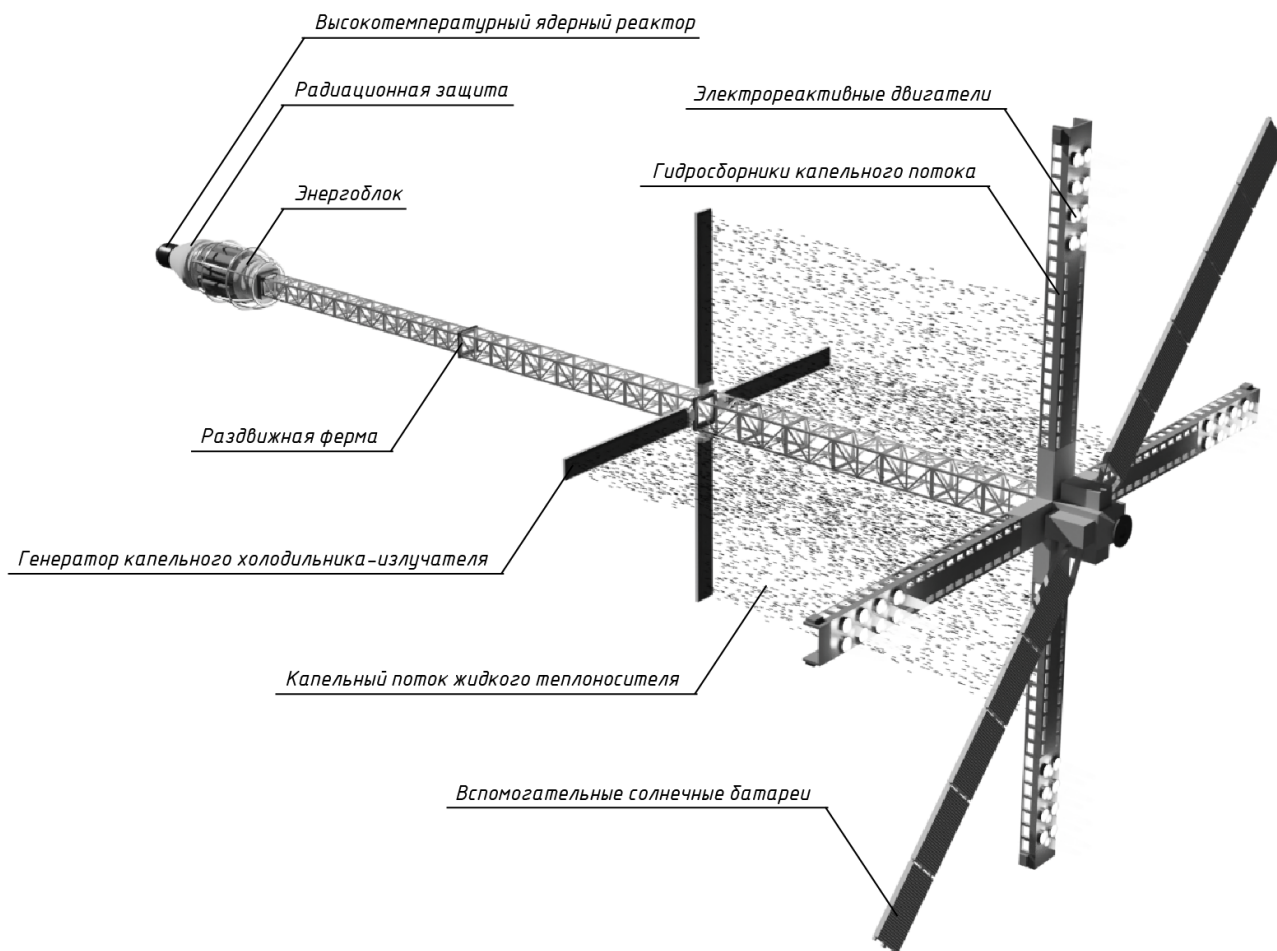
- А) Если между кожей пациента и электродом появится небольшой зазор, то как это скажется на емкости контакта? Почему?
- Б). При снятии электрокардиограммы обычно используют один нулевой («земля») и несколько сигнальных, накладываемых на разные точки тела пациента. Чем обусловлена необходимость такой практики?

Задача 4. Космический буксир

Через тернии к звездам!

В проекте ТЭМ (транспортно-энергетического модуля), предлагается использовать электрореактивный двигатель с ядерным реактором. Для нормальной работы реактора необходимо его эффективное охлаждение с большим теплоотводом, что в космосе проблематично. Один из способов утилизации тепла — жидкокапельное охлаждение. Нагретое жидкое олово (в качестве теплоносителя в охлаждающем контуре реактора) разбивают на капли радиуса $R = 11,25$ мкм вне герметичного отсека. Капли излучают тепло, пролетая в космическом пространстве от разбрызгивателя до специального приемника. Потом они собираются на приемнике и снова поступают в контур охлаждения двигателя. Считать каплю абсолютно черным телом, излучающим тепло при температуре T по закону Стефана-

Больцмана с интенсивностью ($\text{Вт}/\text{м}^2$) $J = \sigma_s T^4$, причем максимум излучения приходится на частоту электромагнитных волн $\nu = bT$, здесь $\sigma_s = 56,7 \text{ нВт}/\text{м}^2\text{К}^4$, $b = 1,04 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}\text{К}^{-1}$. Считать, что капля олова излучает уединенно, находясь в расплавленном состоянии. Температуры плавления и конденсации олова соответственно равны 232°C и 2620°C , а теплоемкость и плотность жидкого олова — $270 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ и $7000 \text{ кг}/\text{м}^3$.



А) При образовании капль (расплав олова пропускается через разбрызгиватель) может происходить их электризация трением (капли будут приобретать отрицательный заряд). Каковы негативные последствия этого явления для ТЭМ? Как их избежать?

Б) При пропускании потока теплоносителя через разбрызгиватель образуются капли, которые вылетают в открытое космическое пространство со скоростью $v = 10 \text{ м}/\text{с}$. Каким должно быть расстояние L между разбрызгивателем и приемником капль для наиболее эффективного охлаждения реактора при максимально возможном перепаде температур теплоносителя?

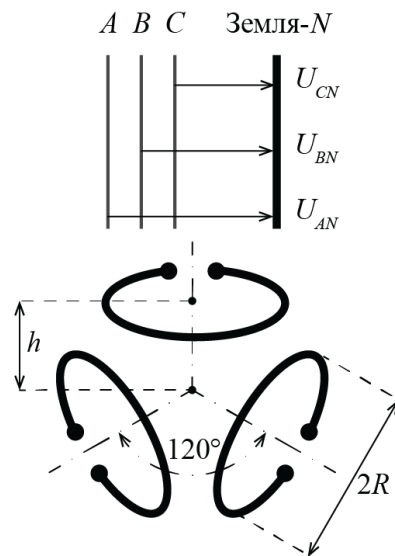
В) При пропускании через разбрызгиватель расплава олова и при образовании капль может происходить их электризация трением (каждая капль будут приобретать отрицательный заряд $Q = 10^4 e$). Рассчитать длину волны электромагнитного излучения, которое способно нейтрализовать заряды капль, если работа выхода жидкого олова $A = 4 \text{ эВ}$.

Г) При каком минимальном модуле постоянного ускорения торможения ТЭМ (вдоль линии движения капль в открытом космосе) и при каком расстоянии между разбрызгивателем и приемником теплоноситель в жидком виде не попадет на панели-приемники? Скорость вылета капль из разбрызгивателя $v = 10 \text{ м}/\text{с}$, как в п. Б).

Задача 5. Электродвигатель переменного тока

Между звездой и треугольником

У асинхронных и синхронных трехфазных электродвигателей, используемых в импеллерах силовых установок электросамолетов, как правило, есть неподвижный статор, который создает внутри себя вращающееся магнитное поле. Это поле приводит во вращение ротор, находящийся внутри статора. Рассмотрим упрощенную модель статора (на рисунке статор показан без ротора), который образован тремя кольцами радиуса $R = 3$ см, сопротивлением $r = 32$ кОм каждое. Их оси лежат в плоскости рисунка под углом 120° друг к другу. Их центры удалены на $h = 4$ см от оси статора.



Фазовые напряжения трехфазной цепи имеют вид:

$U_{AN, BN, CN} = U_m \cos(2\pi vt + \varphi_0)$ с $U_m = 220$ В, $\nu = 50$ Гц и с разными начальными фазами φ_0 . На клеммы колец подают межфазные (линейные) напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} так, что индукция B любого кольца при $\varphi_0 = 0$ и $t = 0$ направлена к оси генератора. В случае $\varphi_0 = 0$ (U_{AB}), $\varphi_0 = 2\pi/3$ (U_{BC}), $\varphi_0 = 4\pi/3$ (U_{CA}) на оси генератора создается равномерно вращающееся, постоянное по модулю поле B_s .

А) Найти с помощью векторных диаграмм амплитуды напряжений на кольцах и их линейные частоты колебаний.

Б) Рассчитать амплитуду магнитного поля в центре статора от одного из колец радиуса R , по которому течет ток I , по формуле $B = \mu_0 IR^2/2L^3$, где L — расстояние от точки на кольце до центра статора.

В) Если поменять местами клеммы подключения U_{AB} на одном из колец, то каковы будут (перечислить) отличительные признаки нового суммарного поля на оси генератора B_s по сравнению с полем до переключения клемм? Найти модуль B_s при $t = 0$ в этом случае.

Г) Пусть ротор представляет собой плоскую кольцевую катушку из жесткой алюминиевой проволоки. Диаметр катушки совпадает с осью вращения магнитного поля. Ротор может вращаться вдоль этой оси (вдоль своего диаметра) практически без трения. Причем через скользящие контакты на оси вращения на эту катушку подается постоянный ток. Когда вращение ротора стабилизируется, то с какой частотой он будет вращаться: больше, меньше или равной частоте вращения магнитного поля? Объяснить, почему.

Задача 6. Эксцентричный барабан

Основной частью стиральной машины является металлический барабан — цилиндр с множеством отверстий, открытый с одного торца и способный вращаться вокруг горизонтальной оси. При вращении барабана помещенные в него предметы перемещаются относительно друг с друга, соприкасаясь друг с другом. В присутствии моющего средства это приводит к их очищению от загрязнений. В режиме отжима барабан, вращаясь с большой скоростью, выжимает из стираемых вещей воду, которая отводится через отверстия в его

стенке. Случается, что если вещи распределены неравномерно, то они собираются в один ком. Это приводит к тому, что при отжиге стиральная машина может начать подпрыгивать, отрываясь от поверхности пола.

Допустим, в стиральную машину массой $M = 80$ кг загрузили белье массой $m = 4$ кг. При отжиге собрался компактный ком, центр масс которого находится на расстоянии $r = 15$ см от оси вращения. Частота вращения барабана $n = 1200$ мин⁻¹. Считая ось барабана жестко закрепленной относительно корпуса машины, а ее ножки не имеющими амортизаторов (упругих элементов), определить:

1. Угол α , образованный (в момент отрыва машины от пола) горизонтальной осью и радиусом, проведенным от оси вращения барабана в центр масс комка.
2. Максимальное смещение Δx , на которое будет перемещаться машина по горизонтали при таком отжиге.

А) Объяснить, как упругая связь оси барабана с корпусом машины позволяет устранить подобные вибрации.

Б) Почему необходимо использовать такие высокие обороты для отжима белья? Объяснить, перечислив явления и законы физики.