

Олимпиада «Физтех.инженер» 2 марта 2024 года  
Решения заданий заключительного тура. 11 класс.

Вариант 1

Задача 1

	Поскольку двигатель многополюсный, линии магнитного поля статора составляют малый угол с плоскостью витков ротора.	
	Для заклинившего двигателя: $M_0 = \frac{\varepsilon}{R} BSN$ .	2
	Для двигателя с постоянным питанием (учтена ЭДС самоиндукции): $an_0 + b = \frac{\varepsilon - 2\pi n_0 BSN}{R} BSN = M_0 - 2\pi n_0 \frac{(BSN)^2}{R} \Rightarrow 2\pi \frac{(BSN)^2}{R} = \frac{M_0 - an_0 - b}{n_0}.$	4
	Для двигателя с ШИМ-питанием: $an_1 + b = \frac{0,5\varepsilon - 2\pi n_1 BSN}{R} BSN = 0,5M_0 - n_1 \frac{M_0 - an_0 - b}{n_0}.$	3
	Откуда $n_1 = n_0 \frac{0,5M_0 - b}{M_0 - b} \approx 22 \text{ мин}^{-1}$ .	1

Задача 2

А)	Источник излучения БПЛА можно считать точечным, ЭМ-волну — сферической: мощность, приходящая на антенну $N_2 = ND^2/16L^2 \approx 10^{-9}$ Вт	1 + 1 (ф-ла + число)
Б)	Излучение, собираемое с площади всей антенны, фокусируется на приемнике, расположенном в точке фокуса. Фокусное расстояние параболоида $F = D^2/16H = 1,8$ м — формулу можно вывести геометрическим построением по отражению двух лучей, один из которых лежит на оси симметрии.	1 + 1 (д-во + число)
В)	Считаем, что излучение приходит на антенну вдоль ее оси симметрии. Минимальный размер приемника должен соответствовать размеру фокального пятна, который оценивается через малый угол уширения $1,2\lambda/D$ как $d = 2,4F\lambda/D \approx 4,5$ см.	1 + 1 (ф-ла + число)
Г)	Эффективная напряженность находится через формулу объемной плотности энергии электрического поля $w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2/2$ (такой же вклад дает магнитное поле); кроме того, надо учесть связь объемной плотности с интенсивностью на приемнике $J_1 = 2cw$ и найти эту напряженность из мощности на приемнике $N_2$ с учетом потерь при отражении на отражателе $E = \sqrt{\frac{8R_a^2 N_2}{\pi\varepsilon c d^2}} = 10^{-3} d \approx 0,014$ В/м.	3 + 1 (ф-ла + число)

Задача 3

	<p>Контакт электрода с внутренней средой естественно представить как параллельно соединенные конденсатор емкостью <math>C</math> и резистор сопротивлением <math>R</math>. В начале импульса конденсатор разряжен. Поскольку емкость конденсатора мала (<math>\tau \gg rC</math>), за время импульса на нем успевает установиться напряжение, и ток через него не идет.</p>	3
	<p>Таким образом, по закону полной цепи</p> $I = \frac{E}{2R + r + R_0} \approx 17 \text{ нА} \Rightarrow U = IR_0 = 0,85 \text{ мкВ}.$	2 + 1 (ф-ла + число)
А)	Для дезинфекции и чтобы убрать загрязнения, увеличивающие сопротивление контакта.	2
Б)	Это связано с очень малой толщиной мембраны: резкий скачок концентрации ионов вызывает значительные диффузионные потоки.	2

Задача 4

А)	<p>В космосе из трех видов теплопередачи работает только излучение, что является серьезным препятствием при проектировании конструкции космического аппарата. Поскольку тепловое излучение в качестве средства охлаждения эффективно только при сверхвысоких температурах, то при более низких температурах необходима большая площадь тепловых радиаторов, а это приводит к большим массам конструкции и очень дорого в плане выведения полезной нагрузки в космос.</p>	2
Б)	<p>Из тепловой мощности можно найти массовый и объемный расход капель, а зная размер капли, можно найти их количество в единицу времени, а значит, можно найти прирост их поверхностной энергии за единицу времени, что можно трактовать как мощность разбрызгивания, или дополнительные энергетические потери. <math>P_{\text{heat}} = C \cdot (dm / dt) \cdot \Delta T = C_p \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \Delta T</math> или</p> $\left( \frac{dN}{dt} \right) = 3P_{\text{heat}} / 4C_p \pi R^3 \Delta T = 1,115 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}.$ <p>Мощность разбрызгивания связана с энергией поверхностного натяжения и равна <math>P_d = \frac{dN}{dt} 4\pi R^2 \sigma = 177 \text{ Вт}</math>. Мощность, связанную с кинетической энергией капель, согласно условию, не надо учитывать, т.к. нас интересуют минимальные затраты.</p>	2 + 1 (ф-лы + числа)
В)	<p>Для грубой оценки спектрального диапазона теплового излучения можно воспользоваться формулой Вина <math>\nu = bT_{\text{min}}</math>. Закон Вина можно применять для температуры конденсации: частота максимума ИК излучения <math>\nu = bT_{\text{min}} = 5 \cdot 10^{13} \text{ Гц}</math> или <math>c/\nu = 6 \text{ мкм}</math>. Если оценивать частоту по начальной температуре, то <math>\nu = bT_{\text{max}} = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ Гц}</math> или <math>1,2 \text{ мкм}</math>.</p> <p><i>Правильный ответ лежит в диапазоне между этими двумя оценками частот.</i></p>	2 + 1 (ф-лы + числа)
Г)	<p>Маневры могут привести к ускорению или торможению центра масс конструкции, а также к ее закрутке относительно центра масс. При ускоренном поступательном движении конструкции вдоль линии движения теплоносителя</p>	2

	(она же продольная ось симметрии) и при отсутствии ее закрутки теплоноситель теряться не будет. Потери теплоносителя будут происходить при закрутке вдоль любой из трех осей и при любом поступательном ускоренном движении вбок от продольной оси (оси движения теплоносителя), а также при очень сильном продольном торможении.	
--	---	--

Задача 5

А)	При расчете напряжения, поданного на кольца, результат получается методом векторных диаграмм, но допустимо и прямое преобразование алгебраической суммы/разности тригонометрических функций напряжений. В данном случае схема подключения колец — «треугольник», поэтому $U_m/\sqrt{3} = 127$ В.	1,5
	Частота в обоих случаях равна 50 Гц.	0,5
	<i>Если участник без доказательств даст правильный ответ, сославшись на схему подключения «треугольник» и на стандартные преобразования фазовых напряжений из линейных, то засчитывается полный балл.</i>	
Б)	Магнитная индукция (по амплитуде) вдоль оси кольца в центре (на оси) статора равна $B_0 = \frac{\mu_0 I_m R}{2L^2} \cos \beta = 1,77 \cdot 10^{-8} \text{ Тл},$ где $L = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$ см; $\cos \beta = \frac{R}{L} = 0,6$ ; $I_m = \frac{U_m}{r\sqrt{3}}$ .	2
В)	Чтобы найти модуль и частоту $B$ в центре генератора, достаточно построить его вектор в два любых удобных момента времени, например, при $t = 0$ , $t = 1/4v$ , т.к. по условию известно, что вращение постоянного по модулю вектора магнитной индукции происходит с постоянной частотой. При $t = 0$ проекции векторов магнитной индукции колец на их соответствующие оси равны: $B_{0AB} = B_0$ , $B_{0BC} = -0,5B_0$ , $B_{0CA} = -0,5B_0$ . Тут знак плюс означает направление в центр ротора, а знак минус — от его центра. Векторная сумма направлена вдоль оси первого кольца и равна $B = 1,5B_0$ .	1
	При $t = 1/4v$ проекции векторов магнитной индукции колец на их соответствующие оси равны: $B_{0AB} = 0$ , $B_{0BC} = -0,866B_0$ , $B_{0CA} = 0,866$ .	1
	Векторная сумма направлена перпендикулярно оси первого кольца и равна $B = 1,5B_0$ . Видим, что по модулю магнитное поле не меняется и равно $2,65 \cdot 10^{-8}$ Тл.	1
	За четверть периода колебаний напряжения магнитное поле повернулось на $90^\circ$ , значит, частота вращения магнитного поля совпадает с частотой напряжения.	1
Г)	В данном варианте рассматривается модель асинхронного двигателя, в котором частота ротора должна быть меньше частоты магнитного поля, чтобы через контур катушки ротора менялось магнитное поле, тем самым создавая ЭДС и ток в роторе.	1
	Именно ток в роторе взаимодействует с магнитным полем статора с помощью момента силы Ампера. Ротор стремится занять такое положение в пространстве, чтобы момент силы был равен нулю, то есть вращение магнитного поля статора заставляет вращаться ротор.	1

Задача 6

	Отрыв происходит при условии $m\omega^2 r \sin \alpha = Mg$ .	2
	Откуда $h = r \sin \alpha = \frac{Mg}{m(2\pi n)^2} = 6,3 \text{ мм} \ll r$ Можно сделать вывод о том, что центробежная сила на несколько порядков больше, чем сила тяжести, поэтому ей можно пренебречь.	2
	На стиральную машину по вертикали действует гармоническая сила $F = m(2\pi n)^2 r \cos(2\pi nt)$ . Эта сила придает машине ускорение, амплитуда которого равна $a_m = \frac{m(2\pi n)^2 r}{M}$ .	2
	Тогда амплитуда смещения по вертикали равна $y_m = \frac{mr}{M}$ . А высота подскоков равна $H = 2y_m = \frac{2mr}{M} = 2 \text{ см}$ .	1
А)	Рассмотрим машину на амортизаторах-пружинках как пружинный маятник под действием гармонической силы. Если подобрать собственную частоту маятника такой, чтобы она была значительно ниже частоты внешней силы, то вертикальные колебания будут незначительны, т.к. будут происходить в противофазе с этой силой.	1
Б)	Да, т.к. центробежная сила также имеет и горизонтальную составляющую.	2

Олимпиада «Физтех.инженер» 2 марта 2024 года  
Решения заданий заключительного тура. 11 класс.

Вариант 2

Задача 1

	Поскольку двигатель многополюсный, линии магнитного поля статора составляют малый угол с плоскостью витков ротора.	
	Для заклинившего двигателя: $M_0 = \frac{\varepsilon}{R} BSN$ .	2
	Для двигателя с постоянным питанием (учтена ЭДС самоиндукции): $an_0 + b = \frac{\varepsilon - 2\pi n_0 BSN}{R} BSN = M_0 - 2\pi n_0 \frac{(BSN)^2}{R} \Rightarrow 2\pi \frac{(BSN)^2}{R} = \frac{M_0 - an_0 - b}{n_0}$	4
	Для двигателя с ШИМ-питанием: $an_1 + b = \frac{0,3\varepsilon - 2\pi n_1 BSN}{R} BSN = 0,3M_0 - n_1 \frac{M_0 - an_0 - b}{n_0}$	3
	Откуда $M_0 = \frac{(n_0 - n_1)b}{0,3n_0 - n_1} = 1,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .	1

Задача 2

А)	Источник излучения БПЛА мощностью $N = W / \tau$ можно считать точечным, ЭМ-волну — сферической (спектральным уширением волн из-за ограниченной длительности импульса можно пренебречь): $J_2 = N/4\pi L^2 \approx 10^{-9} \text{ Вт/м}^2$ .	1 + 1 (ф-ла + число)
Б)	Излучение, собираемое с площади всей антенны, фокусируется на приемнике, расположенном в точке фокуса. Фокусное расстояние параболоида $F = D^2/16H = 0,6 \text{ м}$ , формулу можно вывести геометрическим построением по отражению двух лучей, один из которых лежит на оси симметрии.	1 + 1 (д-во + число)
В)	Считаем, что излучение приходит на антенну вдоль ее оси симметрии. Размер приемника должен соответствовать размеру фокального пятна, который оценивается через малый угол уширения $1,2\lambda/D$ как $d = 2,4F\lambda/D \approx 1,5 \text{ см}$ .	1 + 1 (ф-ла + число)
Г)	Эффективная величина индукции находится через формулу объемной плотности энергии магнитного поля $w = B^2 / 2\mu_0\mu$ (такой же вклад дает электрическое поле); кроме того, надо учесть связь объемной плотности с интенсивностью на приемнике $J_1 = 2cw$ и найти магнитную индукцию из интенсивности на приемнике $J_2$ после отражения на отражателе $B = \sqrt{\frac{2\mu_0 J_2 D^2}{cd^2}} \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ Тл}$ .	3 + 1 (ф-ла + число)

Задача 3

	Контакт электрода с внутренней средой естественно представить как параллельно соединенные конденсатор емкостью $C$ и резистор сопротивлением $R$ . В начале импульса конденсатор разряжен. Поскольку емкость конденсатора мала ( $\tau \gg rC$ ), за время импульса на нем успевает установиться напряжение, и ток через него не идет.	3
	Таким образом, по закону полной цепи $I = \frac{E}{2R + r + R_0} \approx 8,3 \text{ нА} \Rightarrow U = IR_0 = 1 \text{ мкВ}.$	2 + 1 (ф-ла + число)
А)	Емкость согласно формуле плоского конденсатора уменьшится.	2
Б)	ЭДС сердца со временем меняется не только по величине, но и по направлению. По одной зависимости $U(t)$ невозможно полностью охарактеризовать работу сердца.	2

Задача 4

А)	Одноименно заряженные капли расходятся в стороны и не попадают на приемник — теряется теплоноситель. Чтобы уменьшить этот эффект, можно облучать капли жестким ультрафиолетом или мягким рентгеновским излучением (можно подобрать его частоту по работе выхода и по величине заряда капли известного радиуса), чтобы за счет фотоэффекта обеспечить разрядку капель (электроны будут уходить, а капля снова станет нейтральной).	2
Б)	При ограничении массы теплоносителя капли в открытом космосе должны излучать во всем температурном диапазоне существования жидкой фазы от начальной $T_{\max}$ (испарение) до конечной $T_{\min}$ (конденсация), охлаждаясь за фиксированное время $t = L/v$ . В самом деле, если капли теплоносителя застынут, то они упруго отскочат от сборника-уловителя, их будет трудно собрать и отправить обратно в контур охлаждения, они будут потеряны. Если капли остынут незначительно, не до температуры близкой к точке кристаллизации, то теплосъем будет неэффективным. По той же причине первоначальная температура жидкой капли должна быть как можно ближе к температуре испарения, но несколько ниже ее. Время охлаждения абсолютно черного тела рассчитывается через интегрирование мощности излучения по времени с учетом теплового баланса между излучением и жидким металлом $t = (RC\rho / 3\sigma_s) [T_{\min}^{-3} - T_{\max}^{-3}] = 1 \text{ с.}$ Находим расстояние $L = vt = 10 \text{ м}.$	2 + 1 (ф-лы + числа)
В)	По формуле фотоэффекта энергия кванта должна превышать сумму работы выхода $A$ и изменение потенциальной энергии электрона в кулоновском поле при его уходе на бесконечность $hc/\lambda > A + e\Delta\phi$ . Поскольку одноименно заряженные электроны на капле отталкиваются, то изменение потенциальной энергии будет отрицательным. Ее учет приведет к уменьшению частоты кванта или увеличению его длины волны в начальный момент, когда заряд капли максимален $\lambda < \lambda_{\max} = hc / (A - keQ / R) = 300 \text{ нм}$ . Минимальная длина волны находится из условия нейтрализации последнего электрона $\lambda < \lambda_{\max} = hc / A$ , отличие от предыдущего случая пренебрежимо мало.	2 + 1 (ф-лы + числа)

Г)	Минимальное ускорение торможения находится из условия, что скорость капель в момент подлета к панелям-приемникам должна быть хотя бы равна нулю относительно самих панелей $a_{\min} = v/t = 10 \text{ м/с}^2$ , $L = v^2 / 2a_{\min} = 5 \text{ м}$ .	2
----	--	---

Задача 5

А)	При расчете напряжения, поданного на кольца, результат получается методом векторных диаграмм, но допустимо и прямое преобразование алгебраической суммы/разности тригонометрических функций напряжений. Кольца соединены в «звезду», и амплитуда напряжения, поданного на каждое кольцо $\sqrt{3} \cdot U_m = 380 \text{ В}$ .	1,5
	Частота в обоих случаях равна 50 Гц.	0,5
	<i>Если участник без доказательств даст правильный ответ, сославшись на схему подключения «звезда» и на стандартные преобразования линейных напряжений из фазовых, то засчитывается полный балл.</i>	
Б)	Магнитная индукция (по амплитуде) вдоль оси кольца в центре генератора равна $B_0 = \frac{\mu_0 I_m R}{2L^2} \cos \beta = 5,3 \cdot 10^{-8} \text{ Тл},$ где $L = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ см}$ ; $\cos \beta = \frac{R}{L} = 0,6$ ; $I_m = \frac{\sqrt{3} \cdot U_m}{r}$ .	2
В)	Чтобы найти модуль и частоту $B$ в центре генератора, достаточно построить его вектор в два любых удобных момента времени, например, при $t = 0$ , $t = 1/4v$ . Если не менять местами клеммы подключения одного из колец, то при $t = 0$ проекции векторов магнитной индукции колец на их соответствующие оси равны: $B_{0AB} = B_0$ , $B_{0BC} = -0,5B_0$ , $B_{0CA} = -0,5B_0$ . Тут знак плюс означает направление в центр ротора, а знак минус — от его центра. Векторная сумма направлена вдоль оси первого кольца и равна $B = 1,5B_0$ .	1
	Если поменять клеммы для первого кольца, то и направление его магнитного поля развернется в противоположную сторону. Тогда при $t = 0$ проекции векторов магнитной индукции колец на их соответствующие оси равны: $B_{0AB} = -B_0$ , $B_{0BC} = -0,5B_0$ , $B_{0CA} = -0,5B_0$ . Векторная сумма направлена вдоль оси первого кольца и равна $B = -0,5B_0$ .	1
	А в случае при $t = 1/4v$ проекции векторов магнитной индукции колец на их соответствующие оси равны: $B_{0AB} = 0$ , $B_{0BC} = -0,866B_0$ , $B_{0CA} = 0,866$ . Векторная сумма направлена перпендикулярно оси первого кольца и равна $B = 1,5B_0 = 7,95 \cdot 10^{-8} \text{ Тл}$ .	1
	За четверть периода колебаний напряжения магнитное поле повернулось на $90^\circ$ , но в разные стороны (в случаях без смены полярности клемм/при смене полярности клемм). Таким образом, при смене полярности клемм одного из колец магнитное поле будет вращаться в противоположную сторону с той же частотой, но модуль магнитного поля будет не постоянным (будет пульсировать) с максимальным значением $7,95 \cdot 10^{-8} \text{ Тл}$ .	1
	Г)	В данном варианте представлена модель синхронного двигателя. Ток в роторе существует сам по себе (не зависит от изменения потока магнитного поля)

	статора через контур ротора) и без запаздывания взаимодействует посредством момента силы Ампера с вращающимся магнитным полем.	
	Ротор стремится занять такое положение в пространстве, чтобы момент силы был равен нулю. Поэтому ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле в установившемся режиме.	1

### Задача 6

	Отрыв происходит при условии $m\omega^2 r \sin \alpha = Mg$	2
	Откуда $\sin \alpha = \frac{Mg}{mr(2\pi n)^2} \approx 0,08 \ll 1$ . Можно сделать вывод о том, что центробежная сила на несколько порядков больше, чем сила тяжести, а, соответственно, больше и сила трения о пол. Поэтому ей можно пренебречь.	2
	На стиральную машину по горизонтали действует гармоническая сила $F = m(2\pi n)^2 r \cos(2\pi nt).$ Эта сила придает машине ускорение, амплитуда которого равна $a_m = \frac{m(2\pi n)^2 r}{M}.$	2
	Тогда амплитуда смещения по горизонтали равна $x_m = \frac{mr}{M}.$ А максимальное смещение равно $\Delta x = 2x_m = \frac{2mr}{M} = 1,5 \text{ см}.$	1
А)	Рассмотрим машину и барабан как пружинные маятники. У них разные собственные частоты. У машинного маятника частота колебаний значительно ниже, чем частота возбуждающей центробежной силы. Смещения этого маятника при колебаниях происходят в противофазе с действующей силой, и амплитуда этих смещений мала.	1
Б)	Чтобы убрать воду из пространства между волокнами ткани, нужно преодолеть силы поверхностного натяжения с помощью центробежной силы. Сила натяжения пропорциональна размеру этого пространства, а центробежная сила пропорциональна кубу размера. Поэтому чем меньше расстояние, тем бóльшие нужны обороты.	2