10. Глоссарий основных терминов и определений, изучаемых в дисциплине «Общая электротехника и электроника»

1. Глоссарий по электротехнике

1. Уильям Гильберт (1544—1603) — английский физик; основоположник науки об электричестве и магнетизме.

2. Закон Кулона (1736—1806), открытый в 1785 г. на основании опытов с крутильными весами и определяющий силу взаимодействия F двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 на расстоянии r: $F = q_1q_2/4\pi\varepsilon_a r^2$, где $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_o$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_o = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Кл/(В·м) — диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная); ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды, определяющая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данном диэлектрике (среде) меньше силы взаимодействия между ними в вакууме.

3. Закон Фарадея (1791—1867) о сохранении электрического заряда, установленный в 1843 г: в электрически изолированной системе (которая не обменивается зарядами с внешними телами) алгебраическая сумма электрических зарядов является постоянной величиной

4. Напряженность электрического поля: векторная величина **E** = **F**/q (здесь и далее вектор будем обозначать жирным шрифтом), измеряемая силой **F**, действующей в данной точке поля на пробный единичный положительный заряд q. Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности, называются *линиями напряженности*; для точечного заряда они имеют вид лучей, исходящих из точки, где помещен заряд (для положительного заряда) или входящих в нее (для отрицательного).

5. Принцип суперпозиции: если электрическое поле создается зарядами q_1, q_2 ... , q_n, то на пробный заряд q действует сила, равная геометрической сумме сил, действующих на пробный заряд q со стороны поля каждого из зарядов, при этом вектор напряженности равен геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности.

6. Электрический потенциал $\varphi = W/q$ — определяется работой W, которую совершают силы поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность или в другую точку, потенциал которой условно принят равным нулю (в электротехнике это потенциал земли). Совокупность точек поля, потенциал которых

имеет одинаковое значение (φ = const), называется *эквипотенциальной поверхностью* или *поверхностью равного потенциала*; работа перемещения заряда по такой поверхности равна нулю.

7. Электрическое напряжение (падение напряжения на участке цепи) — разность потенциалов между началом и концом участка цепи.

8. Проводники (металлы, растворы кислот, щелочей и солей) — тела, в которых часть микроскопических электрических зарядов способна свободно перемещаться в пределах тела.

8. Диэлектрики или изоляторы (фарфор, резина, стекло, янтарь, различные типы пластмасс) — тела, в которых все микроскопические заряды связаны друг с другом, и, следовательно, не проводят электрический ток.

9. Поляризация диэлектрика — смещение микроскопических зарядов в диэлектрике в однородном поле напряженностью E, в результате чего на его границах возникают связанные некомпенсированные заряды, создающие внутри диэлектрика дополнительное макроскопическое поле, направленное против внешнего поля. При этом на границе двух диэлектриков 1 и 2 нормальные составляющие напряженности электрического поля E изменяются обратно пропорционально величинам диэлектрических проницаемостей граничащих сред, т. е. $E_1/E_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1$.

10. Вектор электрической индукции (смещения) — вектор $\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_o\mathbf{E}$, равный произведению вектора напряженности электрического поля на диэлектрическую проницаемость среды в данной точке. Полный поток электрической индукции через замкнутую поверхность произвольной формы прямо пропорционален алгебраической сумме электрических зарядов, заключенных внутри этой поверхности, и не зависит от зарядов, расположенных вне ее (теорема Гаусса — Остроградского).

11. Электрическая емкость проводника $C = dq/d\varphi$, Ф равна приращению заряда dq, при котором его потенциал увеличивается на $d\varphi$ = 1 В; Ф (фарада) — единица емкости, названная в честь Фарадея; В (вольт) — единица потенциала и напряжения, названная в честь Вольта, создавшего первый источник постоянного напряжения

12. Электрическая емкость совокупности двух (или нескольких) изолированных друг от друга проводников, называемой конденсатором —определяется как $C = q/U$, Ф, т. е. равна отношению заряда одной из его обкладок q к разности потенциалов U между обкладками.

Например, емкость плоского конденсатора с площадью пластин S и расстоянием между ними d: $C = \varepsilon\varepsilon_o S/d$. При параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей соединяемых конденсаторов: $C = C_1 + C_2 + ... + C_n$; при последовательном — $(1/C) = (1/C_1) + (1/C_2) + ... + (1/C_n)$.

13. Энергия электрического поля — определяется произведением заряда *q* на величину потенциала φ: $W = q\varphi$. Энергия системы из двух зарядов q_1, q_2 измеряется работой, которую совершает сила электрического поля при удалении одного из этих зарядов в бесконечность. Если φ_{12} — потенциал поля первого заряда в точке, где находится второй заряд, а φ_{21} — потенциал поля второго заряда, где находится первый, то $W = 0,5\ (\varphi_{21}\, q_1 + \varphi_{12}\, q_2)$. Поскольку при этом один из потенциалов принимается равным нулю, то $W = 0,5q{\cdot}U = 0,5CU^2$. Если заряд измерять в единицах заряда электрона ($1,602{\cdot}10^{-12}$ Кл), то единицей измерения энергии будет эВ (электрон-вольт), широко используемый в ядерной и физике твердого тела

14. Плотность энергии электрического поля — величина, измеряемая энергией W в единице объема V*:* $w = dW/dV = \varepsilon\varepsilon_o E^2/2 = ED/2$ [Дж/м^3]. При этом энергия рассредоточена по всему объему, занимаемому полем, а не локализована в заряженном теле.

15. Пондеромоторные силы (от латинских pondus (вес) и motus (движение)) — силы взаимодействия между заряженными телами. Например, пластины плоского конденсатора притягиваются с силой $F = \varepsilon\varepsilon_o E^2 S/2$, Н (ньютон), где S — площадь пластин.

16. Луиджи Гальвани (1737 — 1798) — итальянский физик и физиолог; первооткрыватель «подвижного» или гальванического электричества, позволившего его соотечественнику Алессандро Вольта (1745—1827) создать первый источник постоянного напряжения (Вольтов столб), сыгравшего важную роль в дальнейшем развитии теории и практики электротехнической науки. Так, в 1802 г. академиком Петровым В. В. (1761—1834) с помощью мощного Вольтова столба была впервые получена так называемая вольтова (электрическая) дуга между угольными электродами и доказана возможность ее использования для плавления металлов и освещения.

17. Электрический ток — направленное движение заряженных частиц (электронов в металлах, ионов в электролитах и т. п.) под действием внешнего электрического поля напряженностью E. При этом для перемещения заряда q на расстояние L (десятки и сотни тысяч километров в случае линий электропередач) необходимо выполнить

работу $A = q \cdot E \cdot L$ за счет механической энергии (вращение вала электрогенератора), химической (аккумуляторы), энергии радиоактивного распада (атомные батареи), тепловой (термобатареи) и других источников энергии.

18. Активное (омическое) сопротивление — сопротивление, оказываемое двигающемуся заряду (например, электронам) за счет «трения» электронов об кристаллическую решетку проводника, что вызывает его нагрев (например, спираль электроплитки) и превращение таким образом электрической энергии в тепловую.

19. Реактивное сопротивление **— с**опротивление катушки индуктивности и конденсатора, препятствующее их заряду: превращению электрической энергии в энергию магнитного поля (для катушки) и энергию электрического поля (для конденсатора).

20. Гипотезе Ампера о магнетизме — проявление магнитных свойств объясняется наличием в телах замкнутых микроскопических электрических токов, вызывающих образование магнитных диполей, обладающих магнитным моментом $P = mh$, где m — магнитная масса полюса; h — расстояние между полюсами. Поведение этих диполей под действием внешнего магнитного поля определяется *магнитной проницаемостью* μ, характеризующей способность материала усиливать или ослаблять внешнее поле, и *магнитной восприимчивостью* χ, характеризующей способность материала сохранять ориентацию диполей после снятия внешнего поля, при этом $\chi = \mu - 1$. По этим параметрам материалы делятся на три группы: *диамагнетики* ($\mu < 1$, $\chi < 0$), *парамагнетики* ($\mu > 1$, $\chi > 0$) и *ферромагнетики* ($\mu >> 1$, $\chi > 0$)

21. Закон Кулона (1788 г.) — две магнитные массы m_1 и m_2 в среде с магнитной проницаемостью μ взаимодействуют с силой $F_m = m_1 m_2 / \mu r^2$, пропорциональной их произведению и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними.

22. Магнитная индукция $B = S_п / NA$ — исходный параметр для магнитного поля, где $S_п = \int_0^\infty u(t)dt$ — вольтсекундная площадь импульса напряжения $u(t)$, индуцируемого в одном витке пробной катушки при наложении или снятии исследуемого магнитного поля напряженностью H; N — число витков пробной катушки; A — площадь катушки в сечении, перпендикулярном магнитным силовым линиям. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением поля в данной точке. Единица измерения индукции в системе СИ (название от Stan-

dard International — международный стандарт) — тесла (Тл) = В·с/м^2 (ранее использовался гаусс (Гс) = 10^{-4} Тл).

23. Магнитный поток Ф = BS, где S — площадь, перпендикулярная вектору магнитной индукции B; если между направлением потока и площадью угол отличается от 90°, то Ф = BScosα, где α — угол между вектором B и перпендикуляром к поверхности. Поток измеряется в веберах (Вб) = В·с (ранее использовался Мкс (максвелл) = 10^{-8} Вб).

24. Потокосцепление ψ = wФ — поток через w витков катушки. Если ее обмотка содержит витки с различным направлением намотки (по и против часовой стрелки), то потокосцепление определяется алгебраической суммой, поскольку направление индуктируемого тока в таких витках будет иметь противоположное направление.

25. Напряженность магнитного поля — вектор, направление которого совпадает с направлением поля в данной точке; модуль вектора H = B/μ_a, где μ_a = $\mu\mu_o$ — абсолютная магнитная проницаемость материала; μ — относительная магнитная проницаемость материала (для сталей μ = 200—5000); μ_o =1,257·10-6 В·с/А·м — магнитная постоянная (принимается в качестве магнитной проницаемости воздушных зазоров). Единица напряженности — А/м, до введения СИ — эрстед (Э); 1 Э = 79,6 А/м. Напряженность магнитного поля в точке, удаленной на расстояние r от прямолинейного проводника с током I: H = I/2πr; внутри проводника на расстоянии *a* от его центра: H = aI/2πr^2; в центре витка радиусом r: H = I/2r; на расстоянии *a* от центра кольцевой катушки с числом витков w: H = wI/2πa; на средней линии l тороидальной катушки (намотанной на кольцевом сердечнике): H = wI/l.

26. Магнитное напряжение — произведение напряженности магнитного поля H на длину участка магнитной линии, измеряется в амперах (А).

27. Магнитодвижущая сила (МДС) или намагничивающая сила (НС) F — магнитное напряжение, взятое по всей длине *l* линии магнитной индукции; для кольцевой цилиндрической катушки с числом витков w: F = Hl = wI, А.

28. Взаимодействие проводников с токами — два проводника с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а с текущими в противоположных направлениях, — отталкиваются. Возникающая при этом сила определяется формулой Ампера: F=μ_a I_1 I_2 l/2πr^2, где I_1, I_2 — значения токов в проводниках, А; l, r — длина проводников и расстояние между ними, м. Приведенная формула использовалась для

определения единицы (эталона) силы тока путем измерения силы: при $I_1 = I_2 = 1$ А, $l = r = 1$ м, $\mu = 1$, $\mu_o = 1{,}257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м получаем $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н.

29. Сила $F = B \cdot I \cdot l$ (случай взаимно перпендикулярных проводника и индукции), действующая в магнитном поле индукцией B на проводник длиной l с током I. При этом направление силы определяется по *правилу левой руки*: если ее расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а выпрямленные четыре пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец укажет направление действия силы.

30. Сила $F = vBq$ (формула получается из п. 28 последовательной подстановкой $I = q/t$ и $l/t = v$), действующая на движущийся со скоростью v заряд q в магнитном поле с индукцией B. В случае, если носителем заряда является электрон ($q = e$), получаем формулу Лоренца (1853—1928): $F = evB$ (случай движения электрона перпендикулярно полю).

31. Коэрцетивная (задерживающая) сила Hc — напряженность поля, при которой симметричная гистерезисная кривая намагничивания $B = f(H)$ пересекает ось H и соответствующая остаточной магнитной индукции Br, определяемой точкой пересечения кривой $B = f(H)$ с осью B. По этим параметрам ферромагнетики делятся на магнитомягкие (с малой Hc) и магнитотвердые (с большой Hc).

32. Источник электродвижущей силы (ЭДС) — источник напряжения E с последовательно включенным внутренним сопротивлением $Ri = 0$.

33. Магнитное сопротивление магнитопровода длиной l и площадью поперечного сечения S: $R_м = l/\mu_a S$.

34. Магнитное сопротивление воздушного промежутка длиной δ и площадью поперечного сечения S: $R_\delta = \delta/\mu_o S >> R_м$, поскольку $\mu_a << \mu_o$.

35. При расчетах магнитных цепей применяются законы, которые совпадают по форме с основными законами электрических цепей. При этом используются следующие аналогии магнитных и электрических величин: магнитный поток Ф — электрический ток I; намагничивающая (магнитодвижущая) сила F — электрическая ЭДС; магнитные сопротивления $R_м$, R_δ — электрическое сопротивление R.

36. Источник напряжения — источник ЭДС E с последовательно включенным $R_i \neq 0$.

37. Источник тока — источник ЭДС E с последовательно включенным $R_i = \infty$. При подключении к такому источнику нагрузки $R_н << R_i$ ток в $R_н$ по закону Ома $I = E/(R_i + R_н) \approx E/R_i$. Практическая реализация источников тока достигается применением стабилизаторов тока.

38. Линейное сопротивление — сопротивление, падение напряжения на котором U является линейной функцией протекающего по нему тока I ($I = U/R$ — закон Ома для участка цепи).

39. Нелинейное сопротивление — сопротивление, падение напряжения на котором U является нелинейной функцией протекающего по нему тока I (закон Ома для участка цепи с таким сопротивлением не выполняется). Примеры: электровакуумный и полупроводниковый диод, термистор и др.

40. Положительное направление тока: во внешней цепи — движение заряженных частиц от положительного зажима источника напряжения к отрицательному, внутри источника — наоборот (в соответствии с принципом непрерывности тока)

41. Одноконтурная цепь — замкнутая цепь, состоящая из последовательно включенных источников напряжения, сопротивлений (активных, реактивных, линейных или нелинейных) и измерительных приборов. Для расчета тока I в такой цепи используется закон Ома для участка цепи ($I = U/R$, где U — падение напряжения на участке цепи сопротивлением R) или обобщенный закон Ома:

$$I = E_s/R_s,$$

где E_s — алгебраическая сумма ЭДС, R_s — арифметическая сумма всех сопротивлений цепи, включая внутренние сопротивления источников напряжения.

42. В замкнутом контуре по п. 41 знак каждой ЭДС в их алгебраической сумме определяется путем сравнения направления тока в контуре, вызванной каждой ЭДС (от зажима «+» к зажиму «–»), с произвольно выбранным направлением обхода контура: при совпадении направлений ЭДС берется со знаком плюс, в противном случае — со знаком минус.

43. Многоконтурная цепь — цепь, состоящая из нескольких одноконтурных.

44. Узел многоконтурной цепи — точка соединений не менее трех проводников (или ветвей).

45. Ветвь многоконтурной цепи — участок цепи, соединяющий два узла.

46. Для расчета тока в каждой ветви необходимо *произвольно* выбрать направления тока в каждой ветви и составить систему уравнений с использованием

— первого закона (правила) Кирхгофа: *алгебраическая сумма токов каждого узла равна нулю*. Это означает, что сумма втекающих в любой узел токов равна сумме вытекающих из него;

— второго закона Кирхгофа: *алгебраическая сумма ЭДС любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений на всех участках контура*. Для составления алгебраической суммы ЭДС необходимо выбрать произвольное направление обхода контура и сравнить с направлением тока, создаваемого во внешней цепи каждой ЭДС, и в случае совпадения взять такую ЭДС со знаком «+» или «–» в противном случае. Для составления алгебраической суммы падений напряжений на всех участках каждого контура Кирхгофа необходимо сравнить предварительно выбранное направление тока в каждой ветви с произвольно выбранным направлением обхода каждого контура: если направления совпадают, то падения напряжений на всех сопротивлениях ветви от такого тока берутся со знаком «+» и с «–» в противном случае.

47. Для определения токов в ветвях методом контурных токов (методом Максвелла) необходимо выбрать направление контурных токов, совпадающее с направлением обхода контура для определения знака ЭДС, и для каждого контура составить уравнение по второму закону Кирхгофа. При составлении алгебраической суммы падений напряжения на сопротивлениях каждой ветви контура необходимо взять со знаком «+» падения напряжений на сопротивлениях всех ветвей от собственного контурного тока I_{KN} и падения напряжений на сопротивлениях смежных ветвей от соседнего контурного тока I_{KNi}, если он совпадает по направлению с I_{KN}, и со знаком «–» в противном случае.

48. Для определения тока Ii в данной ветви методом эквивалентного генератора необходимо

— отключить ее от контура и рассчитать напряжение холостого хода Uxx на ее зажимах;

— отключить источник питания, заменив его перемычкой;

— рассчитать сопротивление короткого замыкания Rкз относительно зажимов ветви;

— рассчитать искомый ток ветви по формуле: Ii = Uxx/(Ri + Rкз).

Rкз можно определить также по формуле: Rкз = Uxx/Iкз, где Iкз — ток короткого замыкания исследуемой ветви.

49. Мощность P, выделяемая на участке цепи сопротивлением R при токе I и падении напряжения U на нем, определяется как $P = U \cdot I$ с выделением тепла $Q = R \cdot I^2 \cdot t$ в джоулях или $Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$ в калориях (закон Джоуля-Ленца).

50. Баланс мощностей: в любой замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей $P_и$, развиваемых источниками электроэнергии, равна арифметической сумме расходуемых в приемниках энергии мощностей $P_п$:

$$P_и = \sum E_k I_k \text{ , } P_п = \sum I_k^2 (R_{ki} + R_k) \text{ ,}$$

где E_k — алгебраическая сумма ЭДС, I_k — ток в цепи, определяемый по обобщенному закону Ома, R_k — суммарное сопротивление всех сопротивлений цепи, R_{ki} — суммарное сопротивление потерь (эквивалентное внутреннее сопротивление).

51. Датский физик Ханс Эрстед (1777—1851) — впервые установил связь между электрическими и магнитными явлениями.

52. Основными параметрами синусоидального сигнала $a(t)=A_m \sin(\omega t + \varphi_o)$ являются мгновенное значение (тока, напряжения или ЭДС) a(t), угловая частота ω, начальная фаза φ_o, амплитудное A_m и действующее (эффективное) значение $A = A_m/(2)^{1/2}$. Амперметры и вольтметры переменного синусоидального тока в любом уголке мира измеряют только действующее значение.

53. Период T синусоидального сигнала, его фаза α, циклическая f и угловая частота ω связаны соотношениями: $\alpha = 2\pi t/T = 2\pi f t = \omega t$.

54. Начальная фаза $\varphi_o = \omega t_0$ — это любое текущее значение угла ωt в пределах одного периода T, с которого начинается наблюдение за синусоидальным сигналом.

55. Для возможности использования методов расчета цепей постоянного тока в цепях переменного тока Штейнмецом был предложен символический метод, заключающийся в замене синусоидальных ЭДС, токов и напряжений их изображениями с использованием экспоненциальных функций комплексной переменной в соответствии с формулами:

$$e = E_м \sin(\omega t + Be) \equiv E_м e^{j(\omega t + Be)} = E_м e^{jBe} e^{j\omega t} = \dot{E}_м e^{j\omega t};$$
$$i = I_м \sin(\omega t + Bi) \equiv I_м e^{j(\omega t + Bi)} = I_м e^{jBi} e^{j\omega t} = \dot{I}_м e^{j\omega t};$$
$$u = U_м \sin(\omega t + Bu) \equiv U_м e^{j(\omega t + Bu)} = U_м e^{jBu} e^{j\omega t} = \dot{U}_м e^{j\omega t},$$

где: e, i, u — мгновенные значения ЭДС, тока и напряжения; $E_м$, $I_м$, $U_м$ — их амплитудные значения; Be, Bi, Bu — их начальные фазовые углы; $\dot{E}_м$, $\dot{I}_м$, $\dot{U}_м$ — комплексные амплитуды ЭДС, тока и напряжения; j = $\sqrt{-1}$ — мнимая единица; $\equiv$ — знак соответствия (эквивалентности).

56. Изображение синусоидальных функций комплексными числами позволило свести интегро-дифференциальное уравнение цепи, состоящей из последовательно включенных резистора сопротивлением R, катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C, к линейному алгебраическому, определяющему в достаточно простом виде (как и для постоянного тока) связь между указанными параметрами цепи и комплексными значениями токов и напряжений в виде:

$$\dot{I}_м (R + j\omega L + 1/j\omega C) = \dot{U}_м \quad (1).$$

57. Из формулы (1) следует, что закон Ома в символической (комплексной) форме может быть записан в виде:

$$\dot{I}_м = \dot{U}_м / Z \quad (2),$$

где для последовательной RLC-цепи $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C$ — комплексное сопротивление, которое чаще всего представляется в виде суммы активного R и реактивного X сопротивлений, т. е. $Z = R + jX$; $X = j(\omega L + 1/j^2\omega C) = j(\omega L - 1/\omega C)$.

58. Слагаемые реактивного сопротивления и полное сопротивление RLC-цепи с учетом правил действия с комплексными величинами могут быть представлены в следующих формах:

— для комплексного емкостного сопротивления: $X_C = -j \cdot x_C = x_C \cdot e^{-j90°}$ с модулем $x_C = 1/\omega C$; — для комплексного индуктивного сопротивления: $X_L = j \cdot x_L = x_L \cdot e^{j90°}$ с модулем $x_L = \omega L$;

— для полного сопротивления: $Z = R + j(x_C + x_L) = R + jX = z \cdot e^{jBr}$ с модулем $z = |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ и аргументом B_r = arctg $\{[\omega L - 1/(\omega C)]/R\}$.

59. Если на входе последовательной RLC-цепи включен источник напряжения $u = U_м \sin(\omega t + B)$ (в комплексной форме — $\dot{U} = U_м e^{jB}$), то на основании (2) (п. 57):

$$\dot{I} = \dot{U}/Z = U_м e^{jB}/z \cdot e^{jBr} = (U_м/z)e^{j(B-Br)} = I_м e^{j(B-Br)},$$

что соответствует току в цепи

$$I = I_м \sin(\omega t + B - B_r),$$

где $I_м = U_м/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$, $B_r = \mathrm{arctg}\,\{[\omega L - 1/(\omega C)]/R\}$ (3).

60. Из (3) (п. 59) следует, что для последовательной RL-цепи (C = 0) $B_r = \mathrm{arctg}\,(\omega L/R)$ и при $\omega \to \infty$ или $R \to 0$ $B_r = 90°$ ток в цепи $I = I_м \sin(\omega t + B - 90°)$ в предельном случае опаздывает относительно входного напряжения на 90°.

61. Из (3) (п. 59) следует, что для последовательной RC-цепи (L = 0) $B_r = \mathrm{arctg}\,(-1/\omega RC)$ и при $R \to 0$ $B_r = -90°$ ток в цепи $I = I_м \sin(\omega t + B + 90°)$ в предельном случае опережает входное напряжение на 90°.

62. Явление, при котором индуктивное и емкостное сопротивления RLC-цепи равны, называется резонансом, т. е. условием возникновения резонанса является равенство X = 0 или $\omega L - 1/\omega C = 0$, откуда легко получается известная формула Томсона для резонансной частоты $\omega_o = 1/\sqrt{LC}$ или $F_o = 1/2\pi\sqrt{LC}$.

63. Из (3) (п. 59) видно, что при последовательном резонансе (для последовательной RLC-цепи) ток в цепи определяется только сопротивлением R и совпадает по фазе с напряжением входного сигнала.

64. При последовательном резонансе напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности превышает напряжение входного сигнала в Q раз, где безразмерная величина $Q = \omega_o L/R = 1/(\omega_o RC)$ называется *добротностью* контура.

65. Полная мощность синусоидального сигнала, выделяемая на участке цепи, равна $S = (P^2 + Q^2)^{1/2}$, где $P = UI\cdot\cos\varphi$; $Q = UI\cdot\sin\varphi$ — соответственно активная и реактивная составляющие полной мощности. Множитель $\cos\varphi$ называется *коэффициентом мощности*, определяющим, какая ее часть тратится с пользой (активная составляющая) или без пользы (на перезаряд индуктивностей и емкостей). В идеальном случае $\cos\varphi = 1$ (при таком коэффициенте энергетикам предприятий выплачивают повышенные премии). При этом ток в цепи совпадает по фазе с напряжением входного сигнала.

66. В трехфазной системе переменного тока соединения генератора с нагрузкой принято обозначать следующим образом: Y/Y_0 — соединение звезда-звезда с нулевым проводом; Y/Y — звезда-звезда; Y/Δ — звезда-треугольник; Δ/Y — треугольник-звезда; Δ/Δ — треугольник-треугольник.

67. В трехфазной системе ЭДС, индуктируемые в обмотках генератора или трансформатора, напряжения на зажимах этих обмоток и токи в них называют фазными, а напряжения между соседними линейными проводами и токи в них — линейными.

68. Для соединения звезда-звезда с нулевым проводом (нейтралью) при симметричной нагрузке линейное $U_л$ и фазное $U_ф$ напряжение связаны соотношением $U_л = \sqrt{3}\,U_ф$, а фазные и линейные токи равны.

69. Для соединения звезда-треугольник при симметричной нагрузке линейные $I_л$ и фазные $I_ф$ токи связаны соотношением $I_л = \sqrt{3}\,I_ф$, а фазные и линейные напряжения равны.

70. При расчете цепей переменного тока в случае периодических напряжений и токов несинусоидальной формы они представляются в виде конечных или бесконечных тригонометрических рядов Фурье.

71. Цепи с распределенными параметрами отличаются тем, что в них индуктивность, емкость, сопротивление и проводимость распределены в пространстве, например, вдоль двух проводников, образующих линию связи.

72. Линии связи (ЛС) характеризуются первичными и вторичными параметрами. К первичным относятся погонное сопротивление R, Ом/м; погонная индуктивность L, Гн/м; погонная проводимость G, См/м; погонная емкость C, Ф/м.

73. Вторичные параметры ЛС рассчитываются с использованием системы телеграфных уравнений. К вторичным параметрам неискажающей (идеальной) ЛС относятся волновое сопротивление $W = (L/C)^{1/2}$, коэффициент затухания $\beta = (RG)^{1/2}$ и коэффициент фазы $\alpha = \omega(LC)^{1/2}$. Условие неискажающей (идеальной) ЛС: R/L = G/C

74. Рабочим режимом ЛС считается режим бегущей волны, при котором на выходе ЛС включено активное сопротивление Rн, равное волновому W. Для такого режима мгновенное значение напряжения в любой точке ЛС $U = Ui\cdot\exp(-\beta l)\cos(\omega t - \alpha l)$, где l — расстояние от нача-

ла ЛС до точки, в которой определяется значение напряжения; ω — частота входного сигнала Ui. Из приведенной формулы видно, что амплитуда бегущей волны напряжения убывает вдоль линии по экспоненциальному закону без отражения от ее конца.

75. При $R_н \neq W$ имеет место режим несогласованной линии, который наиболее ярко проявляется при разомкнутой ($R_н = \infty$) или замкнутой ($R_н = 0$) ЛС. При разомкнутой линии бегущая волна тока, достигнув конца ЛС, резко спадает до нуля (так называемый узел тока), превращаясь в энергию магнитного поля, под действием которого возникает ЭДС самоиндукции, что приводит к повышению напряжения на конце линии и движению зарядов в обратном направлении. Таким образом, дойдя до разомкнутого конца линии, волны вынуждены двигаться в обратном направлении, отражаясь от ее конца. При этом электрические заряды прямой и обратной волн у конца ЛС складываются, в результате чего в этом месте в каждый момент времени формируется удвоенное напряжение (так называемая пучность напряжения). Для характеристики линии в рассматриваемом режиме используется коэффициент отражения $p = (R_н – W)/(R_н + W)$. При $R_н = W$ коэффициент $p = 0$ и в линии имеет место режим бегущей волны. При разомкнутой линии $R_н = \infty$ и $p = 1$. При этом на выходе линии амплитуды напряжения и тока $U_m = U_п(1 + p) = 2U_п$; $I_m = I_п(1 – p) = 0$; падающие и отраженные волны напряжения имеют одинаковую фазу, а волны тока — противоположную.

76. При замкнутой линии $R_н = 0$ и $p = –1$. При этом на выходе линии амплитуда напряжения и тока $U_m = U_п(1 + p) = 0$; $I_m = I_п(1– p) = 2I_п$, падающие и отраженные волны тока имеют одинаковую фазу, а волны напряжения — противоположную.

77. Переходные процессы в электрической цепи возникают при любом изменении параметров цепи и наличии хотя бы одного реактивного сопротивления.

78. Классический метод анализа переходных процессов заключается в составлении дифференциального уравнения цепи, решение которого представляет собой сумму двух величин: 1) частного решения, выражающего установившийся режим, и 2) общего интеграла дифференциального уравнения с нулевой правой частью, выражающего свободный режим.

79. Операторный метод расчета переходных процессов заключается в замене функции времени f(t) (оригинала) ее операторным изо-

бражением по Лапласу и нахождении оригинала после решения операторного уравнения в простой алгебраической форме.

80. Интеграл Дюамеля используется для анализа переходных процессов при подключении исследуемой цепи к источнику непрерывно изменяющегося напряжения произвольной формы, которое можно описать аналитическими выражениями на каждом участке.

81. К цепям с взаимной индуктивностью относятся многообмоточные трансформаторы или как минимум две близко расположенные катушки индуктивности, связь между которыми определяется коэффициентом взаимной индуктивности, измеряемым в генри (Гн).

82. Принцип работы любой электрической машины основан на законах электромагнитной индукции. В проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает электродвижущая сила и, наоборот, помещенный в магнитное поле проводник с током испытывает механическое воздействие. Если проводник перемещается в магнитном поле в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям, то индуцированная в нем ЭДС

$$e = l \cdot v \cdot B,$$

где l — длина активной части проводника, пересекающей магнитные силовые линии, м; v — скорость перемещения проводника, м/с; B — магнитная индукция, Тл.

Направление ЭДС определяется по *правилу правой руки*: если ладонь руки расположить перпендикулярно магнитным силовым линиям и отогнутый большой палец направить по движению проводника, то остальные пальцы будут указывать направление ЭДС.

83. Принцип работы электродвигателей постоянного тока основан на взаимодействии магнитного поля и находящегося в нем проводника с током *i*. Если проводник расположен в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям, то на него действует сила $F = l \cdot i \cdot B$, направление которой определяется по *правилу левой руки*: если ее расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а выпрямленные четыре пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец будет указывать направление действия силы.

84. Исходными данными при расчете статических (в установившемся режиме) параметров приводов с двигателями постоянного тока являются: номинальные мощность $P_н$, Вт или момент на валу $M_н$, Н·м; напряжение питания U, В; ток якоря $I_н$, А; скорость вращения n, об/мин; момент инерции двигателя $J_д$, кг·м^2; сопротивление обмотки

якоря R_{15} при температуре 15°С; число пар полюсов *p;* тип нагрузки — чаще всего редуктор с заданным числом оборотов на выходе $n_р$, статическим $M_р$, Н·м и моментом инерции $J_р$, кг·м^2. Иногда задается маховой момент двигателя $mD^2 = 4J$, где m, D, J — масса, диаметр и момент инерции ротора соответственно. Расчету подлежат следующие параметры:

1. Номинальное значение угловой скорости в единицах СИ $\omega_н = \pi n/30$, рад/с.

2. Индуктивность обмотки якоря $L = \beta U/p\omega_н I_н$, Гн, где коэффициент β рекомендуется принимать равным 0,6 для машин без компенсации и 0,25 — с компенсацией реакции якоря.

3. Электромагнитная постоянная времени $T_е = L/R$, с.

4. Номинальный момент двигателя на валу $M_{нв} = P_н/\omega_н$, Н·м (если он не задан).

5. Скоростной коэффициент двигателя (коэффициент противоЭДС) $К_е = (U – I_нR)/\omega_н$, В·с.

6. Коэффициент момента на валу $К_{мв} = M_{нв}/I$, Н·м/А (коэффициент пропорциональности между током якоря и номинальным моментом); при расчетах чаще всего используется коэффициент электромагнитного момента $К_м = К_е$, Н·м/А и соответственно электромагнитный момент $M_н = К_м I$, Н·м.

7. Коэффициент передачи редуктора $К_р = n/n_р$.

8. Момент инерции системы (с учетом редуктора) $J = \delta J_д + J_р/К_р^2$, кг·м^2; коэффициент δ = 1,1—1,15 [33].

9. Электромеханическая постоянная времени $T_м = JR/К_е К_м$, с.

10. Статический момент $M_с = M_р/n_р$, Н·м.

11. Сопротивление якоря при температуре 75 °С $R_{75} = R_{15}(1 + \alpha\Delta T)$; α — температурный коэффициент сопротивления провода обмотки якоря (для меди α = 0,004 1/°С); ΔT = 75 – 15 = 60 °С; результат расчета обычно округляется в большую сторону, чтобы тем самым учесть сопротивление токопроводящих проводников.

12. Статический (установившийся) ток $I_с = I_н M_с/M_н$, А.

13. Статическая угловая скорость $\omega_с = U/K_е – I_с R_{75}/K_е$, рад/с.

14. Передаточный коэффициент двигателя по скорости $К_с = 1/К_е$; является коэффициентом пропорциональности между противоЭДС двигателя и угловой скоростью вращения якоря.

15. Передаточный коэффициент двигателя по моменту $К_{мм} = К_{мв}/R_{75}$.

16. Коэффициент внутреннего скоростного трения двигателя $К_т = К_е К_{мм}$, Н·м/(рад/с); определяет наклон механической характеристики двигателя.

85. Динамические характеристики двигателя постоянного тока определяются дифференциальным уравнением:

$$(d^2\omega/dt^2)T_э T_м + (d\omega/dt)T_м + \omega = (U - I_c R)/K_e,$$

где $T_э = L/R$, $T_м = JR/K_e K_м$ — электромагнитная и электромеханическая постоянные времени двигателя; $I_c = M_c/K_м$ — статический (установившийся) ток якоря.

Для ненагруженного двигателя ($I_c = 0$) коэффициент передачи по скорости:

$$K(p) = \omega(p)/U(p) = K_д/(p^2 T_э T_м + pT_м + 1),$$

где $K_д = 1/K_e$ — статический коэффициент передачи двигателя; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования.

86. Принцип действия асинхронных двигателей переменного тока основывается на использовании *вращающегося магнитного поля*, создаваемого статорной обмоткой и иллюстрируемого лабораторным опытом на рис. 1.86, где такое поле создается подковообразным магнитом 2, приводимым во вращение ременной передачей через колесо 3. При этом находящееся над магнитом металлическое кольцо 1 начинает вращаться в ту же сторону, что и магнит. Причина такого явления заключается в том, что при вращении магнита 2 его поле, оставаясь постоянным по величине, поворачивается вместе с ним, что вызывает изменение магнитного потока через кольцо 1, приводящее к возникновению в нем индуцируемого тока. По правилу Ленца этот ток создает силу, направленную против движения магнита и, согласно третьему закону Ньютона, в результате противодействия кольцо само начинает вращаться.

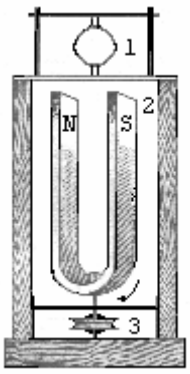


Рис. 1.86

В случае асинхронного двигателя круговое поле статора, пересекая проводники роторной обмотки, индуцирует в них ЭДС, под действием которой в проводниках роторной обмотки возникают токи, которые в результате взаимодействия с магнитным полем статора создают элек-

тромагнитную силу, приводящую ротор во вращательное движение. При этом угловая скорость вращения ротора $\omega_р$ всегда меньше угловой скорости вращения кругового поля статора ω_s. Если бы ротор вращался синхронно с полем, то не было бы относительного движения и соответственно изменения магнитного потока, являющегося основным источником индуцированной ЭДС ($e = – d\Phi/dt$ по закону Фарадея), т. е. в роторе не было бы тока и не могли бы возникнуть силы, приводящие его во вращение. Следовательно, рассматриваемый двигатель может работать только при числе оборотов, несколько отличающемся от числа оборотов поля. Поэтому такие двигатели и стали называть асинхронными.

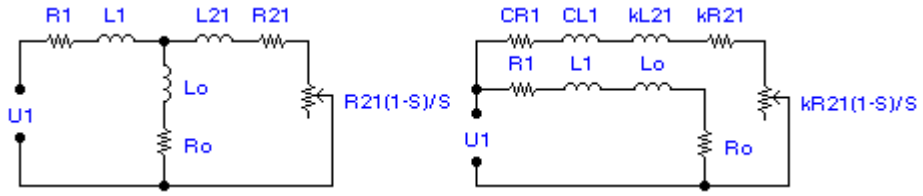
Если поле вращается с угловой скоростью ω_s, а ротор — со скоростью $\omega_г$, то вращение поля относительно ротора происходит со скоростью $\omega_s – \omega_г$, и этой разностью в основном и определяется величина индуцируемой в роторе ЭДС и тока. Величина $S = (\omega_s – \omega_г)/\omega_s$ называется *скольжением*. Для асинхронных двигателей общего применения скольжение составляет несколько процентов. Например, если для двухфазного двигателя синхронная скорость равна 1500 об/мин (25 Гц при частоте питающей сети 50 Гц), то скорость вращения его вала (ротора) может составлять 1450 об/мин.

87. Статические характеристики приводов с асинхронными двигателями определяются параметрами: номинальные мощность $P_н$, Вт или момент на валу $M_н$, Н·м; напряжение питания U, В и частота питающей сети f, Гц; скорость вращения n, об/мин; момент инерции ротора $J_д$, кг·м^2; число пар полюсов *p*; тип нагрузки (чаще всего редуктор с заданным числом оборотов на выходе $n_р$) со статическим $M_р$, Н·м и моментом инерции $J_р$, кг·м^2; пусковой момент $M_п$, Н·м; электромеханическая постоянная времени $T_м$, с в номинальном режиме.

При анализе асинхронных двигателей используются Т-образная (рис. 1.87, *а*) и Г-образная (рис. 1.87, *б*) схемы замещения, аналогичные схемам замещения трансформатора. На схемах обозначено: U1 — напряжение питания; R1, L1 — активное сопротивление и индуктивность статора; Lo, Ro — реактивная и активная составляющие при холостом ходе; $L21 = К_п L2$, $R21 = К_п R2$ — приведенные к обмотке статора индуктивность L2 и активное сопротивление R2 ротора; $К_п = К_т К_е$ — коэффициент приведения сопротивлений; $К_е = w_1 k_{w1}/w_2 k_{w2}$ — коэффициент трансформации ЭДС ($E21 = К_е E2$); $К_т = m_1 w_1 k_{w1}/m_2 w_2 k_{w2}$ — коэффициент приведения (трансформации) токов ($I21 = К_т I2$); m_1, m_2 — число фаз статора и ротора; w_1, w_2 — число витков статорной и роторной обмоток; k_{w1}, k_{w2} — обмоточные коэффициенты статора и ротора (их значения находятся в пределах 0,9—0,96); $C = 1 + (R1 + j\omega_s L1)/(Ro + j\omega_s Lo)$ — коэффициент перехода к Г-образной схеме (C = 1,02—1,05); $k = C^2$. Для короткозамкнутого ротора типа беличьего ко-

леса принимается: $w_2 = 0,5$; $k_{w2} = 1$; число фаз m_2 выбирается равным количеству Z_2 стержней (проводников); в такой обмотке ротора «фазы» сдвинуты на угол $2\pi/Z_2$ при числе полюсов, равном числу полюсов статора.

Основное отличие показанных на рис. 1.87 схем замещения от аналогичных для трансформатора заключается в том, что в ней вторичная обмотка — ротор — нагружена на сопротивление R21(1 – S)/S, зависящее от скольжения S и, следовательно, от режимов работы двигателя.



а) б)

Рис. 1.87. Эквивалентные схемы асинхронного двигателя

88. Поскольку по сравнению с двигателями постоянного тока асинхронные отличаются существенной нелинейностью характеристик, то при их расчете используются приближенные формулы с применением следующих параметров:

1. Коэффициент управления $\alpha = U_у/U_в$, где $U_у$, $U_в$ — напряжения на управляющей и обмотке возбуждения.

2. Синхронная скорость вращения $\omega_с = 2\pi f/p$, рад/с (p — число пар полюсов; f — частота питающей сети, Гц).

3. Скорость холостого хода $\omega_о = 2\alpha\omega_с/(1+\alpha^2)$.

4. Электромагнитная мощность $P_э = \omega_с M$, где M — электромагнитный момент.

5. Вращающий момент двигателя $M_д = P_э/\omega_с$.

6. Механическая мощность двигателя $P_м = M_д\omega_с$.

7. Коэффициент передачи по моменту $K_{мв} = M_п/U_у = 2U_в/\omega_с R$, [Н·м/В=А·с], где R — приведенное к управляющей обмотке сопротивление ротора.

8. Коэффициент внутреннего скоростного трения двигателя $K_т = U_у^2(1 + \alpha^2)/\omega_с^2 R$, Н·м·с; определяет наклон механической характеристики двигателя.

9. Электромеханическая постоянная времени $T_м = J_д\omega_с/M_п(1 + \alpha^2 K^2)$, где K — отношение числа витков обмотки возбуждения к числу витков обмотки управления (для двигателей с полым немагнитным ротором $T_м$ = 0,01—0,1 с, с ротором типа беличьего колеса — 0,2—1,5 с, с полым ферромагнитным ротором — 1—3 с).

10. Коэффициент передачи редуктора $K_р = n/n_р$.

11. Момент инерции системы (с учетом редуктора) $J = \delta J_д + J_р/К_р^2$, кг·м^2; коэффициент δ = 1,1—1,15 [74].

12. Статический момент $M_с = M_р/n_р$, Н·м.

13. Передаточный коэффициент двигателя по скорости $К_с = 1/К_е$.

89. Исследование динамических характеристик асинхронных двигателей в полном объеме вызывает значительные трудности вследствие сложности электромагнитных процессов, описываемых целой системой уравнений, в том числе и нелинейных. В связи с этим электромагнитные процессы анализируются достаточно редко и только в случае приводов со сложной структурой управления. Кроме того, электромагнитные переходные процессы в цепях переменного тока завершаются достаточно быстро — как правило, в течение одного периода питающего напряжения. Поэтому в большинстве случаев учитываются только механические переходные режимы и передаточная функция асинхронного двигателя представляется как

$$К(р) = К_д/(1 + рТ_м),$$

где постоянная времени $Т_м$ может принимать различные значения при переходе с одной характеристики на другую вследствие их различной крутизны.

Если двигатель нагружен редуктором с коэффициентом передачи n, то с учетом скоростного трения $К_д = n \cdot К_т/К_е(n^2К_т + К_р)$, $Т_м = (n^2J + J_м)/(n^2К_т + К_р)$, где $К_т$, $J_м$ — коэффициент скоростного трения и момент инерции редуктора.

90. Электромагнитные приводы (ЭМП) различаются по роду тока (постоянного и переменного, со встроенными выпрямителями, смешанные или универсальные), по характеру перемещения рабочего органа (с поступательным движением (толкающие, тянущие), возвратно-поступательные, с вращательным движением (поворотные, колебательные) и др.), по быстродействию (сверхбыстродействующие, быстродействующие, нормальные, замедленные), по типу магнитной цепи (с разомкнутой и замкнутой магнитной цепью) и др.

Основным устройством электромагнитного привода является электромагнит. Принцип действия такого устройства основан на использовании сил взаимодействия ферромагнитного материала с магнитным полем. При прохождении тока по обмотке электромагнита в цепи магнитопровода возникает магнитный поток, который, пронизывая магнитопровод и его подвижную часть — якорь, — создает в области рабочего зазора силу притяжения, под действием которой якорь перемещается в сторону стопа.

91. При ориентировочных расчетах ЭМП используются следующие соотношения:

1. Конструктивный фактор КФ = $10^{-3}P^{1/2}/b$, $кН^{1/2}/м$, где P — тяговое усилие, Н; b (δ) — рабочий ход, м. При КФ = 6,5—47 выбирается конструкция с плоским стопом, при КФ = 0,15—11 — с коническим стопом с углом при вершине α = 60° (наиболее типичный случай), при КФ > 47 — с дисковым (с наружным, как у реле) якорем.

2. Диаметр якоря $d = 1{,}79\cdot10^{-3}P^{1/2}/B$ — для ЭМ с плоским стопом; $d = 1{,}79\cdot10^{-3}P^{1/2}/B\cdot\sin\alpha/2$ — с коническим; $d = 1{,}265\cdot10^{-3}P^{1/2}/B$ — с дисковым якорем; B = 0,7—1,1 Тл (Тл = $Вб/м^2$ = $В\cdot с/м^2$ = $кг/А\cdot с^2$) — магнитная индукция в зазоре (Вб = В·с — единица магнитного потока).

3. Размеры магнитной системы: наружный диаметр D = 2d, м; длина L = (0,7—1,8)D, м, для ЭМ с дисковым якорем L = (0,4—0,8)D, м; внутренний диаметр (под обмотку) D_i = 0,87D, м; толщина фланца со стороны якоря C = 0,12D, м, со стороны стопа — C_i= 0,06D,м; длина окна под катушку обмотки l = L – 2C, м; длина стопа под катушку — (0,3—0,55)·l, м.

92. Временные параметры ЭМ характеризуются временем трогания (с момента подключения источника питания до начала движения якоря), временем срабатывания (движения), когда якорь приходит в соприкосновение со стопом, и временем отпускания (возврата) якоря в исходное состояние после отключения источника питания. Время трогания зависит от параметров электромагнита и противодействующих сил. Время движения (по параболической кривой) зависит от параметров электромагнита, отношения его тягового усилия к противодействующей перемещению силе (запаса по усилию) и инерционности подвижных частей. Время возврата зависит от инерционности подвижных частей и значения возвращающей силы.

2. Глоссарий по электронике

1. Активность атомов любого элемента при взаимодействии с другими элементами вещества определяется валентными электронами, расположенными на внешней оболочке атома и легко покидающими свою орбиту, определяя тем самым электропроводность материала.

2. При нагревании полупроводника часть валентных связей нарушается под действием тепловых колебаний атомов в решетке, что приводит к одновременному образованию свободных электронов и пустых мест — дырок, которые, совершая хаотическое движение в течение некоторого времени (времени жизни), рекомбинируют (соединяются) с одним из свободных электронов, образуя стабильный атом решетки.

3. Собственные или типа i (от англ. intrisinc — собственный) полупроводники характеризуются высокой чистотой полупроводника, собственная проводимость которого определяется парными носителями заряда (электрон — дырка) теплового происхождения.

4. Примесная проводимость полупроводников обусловлена наличием примесных атомов, замещающих часть основных атомов в узлах кристаллической решетки.

5. Электронные или полупроводники n-типа характеризуются наличием донорных («отдающих» электроны) примесей, валентность которых на единицу выше (по отношению к германию и кремнию это фосфор, мышьяк и другие элементы).

6. Полупроводники с дырочной или проводимостью p-типа характеризуются наличием акцепторной («принимающей» электроны) примесью, валентность которой на единицу меньше (по отношению к германию и кремнию это алюминий, галлий, бор, индий и другие элементы).

7. Электронно-дырочный или p-n—переход — это комбинация из двух полупроводников с различными типами проводимости (p- и n-типа, рис. 2.1, *а*), которая создается с применением специальных технологий (сплавлением, диффузией и др.)

8. Поскольку концентрация дырок в p-слое больше, чем в n- слое, то некоторая их часть за счет диффузии перейдет в n-область, где они будут рекомбинировать с электронами до тех пор, пока не установится равновесие, в результате чего на границе перехода со стороны n-слоя будет создана зона 2 (рис. 2.1, *а*) нескомпенсированных положительных зарядов (ионов) донорных атомов.

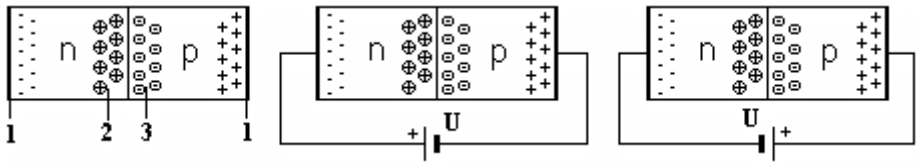
9. Аналогичными п. 8 процессами будет сопровождаться переход электронов из n- в p-область, в результате чего на границе перехода со стороны p-слоя будет создана зона 3 (рис. 2.1, *а*) нескомпенсированных отрицательных зарядов (ионов) акцепторных атомов.

10. Электрическое поле пространственных зарядов между зонами 2 и 3 (рис. 2.1, *а*) характеризуется контактной разностью потенциалов $\Delta\varphi_o$, определяемой соотношением концентраций основных и неосновных носителей (например, дырок и электронов для p-слоя) и температурным потенциалом $\varphi_T = kT/q$, где $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл — заряд электрона (при «комнатной» температуре T = 300 °К и $\varphi_T \approx 26$ мВ).

Значение $\Delta\varphi_o$ для германия составляет около 0,35 В и 0,62 В — для кремния.

11. Для подключения внешних выводов используются омические (невыпрямляющие) контакты 1 (рис. 2.1, *а*) из олова, золота и других материалов, не создающих в сочетании с полупроводником p-n—переход.

12. Если к p-n—переходу подключить источник постоянного напряжения U плюсом к n-области (рис. 1, б), то в области перехода потенциальный барьер увеличится до $\Delta\varphi = \Delta\varphi_o + U$ (p-n—переход расширяется) вследствие того, что электроны n-области притягиваются (отталкиваются от перехода) к положительному зажиму источника, а дырки p-области — к отрицательному и количество пересекающих переход носителей заряда существенно уменьшается.



а) б) в)

Рис. 2.1. Структура p-n—перехода

13. Указанное в п. 12 включение p-n—перехода называется обратным (непроводящим), при котором неосновные носители (дырки для n-области и электроны для p-области), оказавшиеся за счет хаотического теплового движения вблизи перехода, переносятся его полем, образуя обратный ток I_o , который для кремния увеличивается в два раза при увеличении температуры на каждые 10 °С.

14. Если поменять полярность подключения источника (рис. 1, в), то в области перехода потенциальный барьер снижается до $\Delta\varphi = \Delta\varphi_o - U$ (p-n—переход сужается) вследствие того, что электроны n-слоя и дырки p-слоя отталкиваются в область перехода и количество пересекающих его носителей заряда существенно увеличивается.

15. Указанное в п. 14 включение p-n—перехода называется прямым (проводящим) и для этого случая его вольтамперная характеристика (ВАХ) описывается формулой:

$$I = I_o[\exp(U/n\varphi_т) - 1],$$

где I — ток через переход при напряжении U; I_o — обратный (тепловой) ток; n = 1…2 — поправочный коэффициент, учитывающий отклонение характеристики от идеальной (теоретической); $\varphi_т$ — температурный потенциал (см. п. 10). Приведенная формула считается основным уравнением полупроводниковой электроники.

16. Биполярный транзистор был разработан в 1950 году американским физиком В. Шокли. Название «транзистор» происходит от английских слов transfer и resistor, т. е. буквально — «передающий резистор». Название «биполярный» объясняется тем, что, являясь трехэлектродным прибором, транзистор представляет собой конструкцию из двух p-n—переходов, один из которых, называемый эмиттерным, смещен в прямом направлении (одна полярность), а другой, называемый коллекторным, смещен в обратном направлении (вторая полярность). Область между этими двумя переходами называется базой, толщина которой существенно меньше длины свободного пробега носителей заряда, благодаря чему большая их часть (98% и более), инжектируемая прямо смещенным переходом база-эмиттер, достигает перехода база-коллектор и, подхватываясь «благоприятным» направлением поля этого перехода, образует коллекторный ток $I_к$. Общее же количество инжектируемых носителей образует эмиттерный ток $I_э$, их незначительная часть (2% и менее) рекомбинирует в области базы, образуя базовый ток $I_б$.

17. Схемы включения биполярных транзисторов ОБ (общая база) — управляющим электродом является эмиттер, выходным — коллектор, база — общим для входного и выходного сигналов; ОЭ (общий эмиттер) — управляющим электродом является база, выходным — коллектор, эмиттер — общим для входа и выхода; ОК (общий коллектор или эмиттерный повторитель) — управляющим электродом является база, выходным — эмиттер, коллектор — общим для входа и выхода.

18. Поскольку выходной величиной является коллекторный ток, то отношение $\alpha = I_к/I_э < 1$ называют коэффициентом усиления тока эмиттера для схемы ОБ. Так как $I_э = I_к + I_б$, то для схемы ОЭ с учетом α коэффициент усиления тока базы $\beta = I_к/I_б = \alpha/(1 - \alpha)$. Коэффициенты α и β зависят от толщины базы: чем она тоньше, тем меньшее количество инжектируемых электронов (или дырок) будет в ней «застревать» (рекомбинировать) (уменьшение $I_б$) и тем большее их количество будет проходить к коллекторному переходу (увеличение $I_к$); значение α = 0,999 (β = 999) было достигнуто в меза-транзисторах спустя несколько десятилетий после изобретения транзистора благодаря усовершенствованию технологии их изготовления.

19. Входная ВАХ биполярного транзистора ($I_{бэ} = f(U_{бэ})$) в режиме малых сигналов практически совпадает с ВАХ прямо смещенного p-n—перехода.

20. Эффект Эрли в биполярных транзисторах — это эффект модуляции толщины базы, вызываемый изменением напряжения на коллекторе в режиме больших сигналов (при увеличении этого напряжения толщина базы уменьшается); поэтому в справочниках входная ВАХ ($I_{бэ} = f(U_{бэ})$) часто приводится для двух значений коллекторного напряжения.

21. Семейство выходных ВАХ — это зависимость коллекторного тока от коллекторного напряжения при нескольких фиксированных значениях токах базы $I_б$ ($I_к = f(U_к)_{Iб=const}$).

22. Полевые транзисторы отличаются от биполярных тем, что в них используются носители только одного типа (электроны или дырки) и основным способом их движения является дрейф в электрическом поле.

23. Полевые транзисторы с управляющим p-n—переходом отличаются от биполярных тем, что управляющий p-n—переход работает в обратно смещенном режиме, что обеспечивает высокое входное сопротивление (до 10^{12} Ом) и малый ток утечки (до 10^{-12} А).

24. МДП-транзистор — полевой транзистор с Металлическим затвором и Диэлектрической пленкой между затвором и Полупроводником p- или n-типа, проводимость которого управляется электрическим полем затвора.

25. Полевые МДП-транзисторы характеризуются повышенным входным сопротивлением (до 10^{15} Ом) и малым током утечки (до 10^{-15} А).

26. Основные характеристики полевых транзисторов, кроме перечисленных в п. 23 и 25: *крутизна характеристики* — отношение приращения тока стока к приращению напряжения на затворе (до 30 мА/В), *напряжение отсечки* — напряжение затвор-исток, при котором ток стока минимален и *пороговое напряжение* — напряжение затвор-исток, при котором индуцируется (создается) канал (только для МДП-транзисторов с индуцированным каналом).

27. Основным недостатком МДП-транзисторов является необходимость электростатической защиты, особенно у МОП-транзисторов, затвор которых изолирован от канала весьма тонким слоем Окисла

кремния, который легко пробивается при соприкосновении с руками монтажника (по данным компании Motorola, в сухую погоду (при влажности 10—20%) ходьба по ковру вызывает генерацию на теле человека статического электричества до 35 кВ); поэтому изделия с такими транзисторами, как правило, поставляются в токопроводящих упаковках, а при их монтаже используются специальные средства защиты: заземленные паяльники и браслеты для рук, монтажные инструменты с токопроводящими ручками, полы и монтажные столы с антистатическим покрытием, поддержка соответствующей влажности воздуха (в некоторых случаях с дополнительной ионизацией).

28. Типы цифровых интегральных микросхем (ИМС) средней и высокой степени интеграции: ИМС, выполненные по биполярной, КМОП- и смешанной БИ-КМОП-технологии; ИМС на Комплементарных МОП-транзисторах (комбинации из двух МОП-транзисторов с каналами разной проводимости (n- и p-типа)); отличаются высокой экономичностью и быстродействием.

29. Параметры наиболее часто используемого усилительного каскада с общим эмиттером: коэффициент усиления по напряжению равен отношению коллекторного сопротивления к эмиттерному; для выбора рабочего режима и его стабильности используется низкоомный делитель напряжения в базовой цепи и резистор — в эмиттерной; для уменьшения нелинейных искажений напряжение на коллекторе в статическом режиме (при отсутствии входного сигнала) не должен превышать половину напряжения питания коллекторной цепи.

30. Критерии выбора оптимальных параметров дифференциального каскада: обеспечение идентичности транзисторной пары и коллекторных нагрузок; постоянство суммарного эмиттерного тока транзисторной пары, что достигается использованием в эмиттерной цепи высококачественного стабилизатора тока.

31. В стабилизаторе тока на базе каскада с ОЭ используется свойство этого каскада поддерживать постоянство коллекторного тока при изменениях нагрузки и напряжения на коллекторе за счет большого динамического сопротивления, равного отношению приращений напряжения на коллекторе и коллекторного тока, а также стабилизация положения рабочей точки на входной характеристике транзистора.

32. В дифференциальных каскадах операционных усилителей (ОУ) часто используется составной транзистор (каскад Дарлингтона), коэффициент усиления которого по току равен произведению коэффициентов усиления первого и второго транзисторов, образующих каскад Дарлингтона.

33. Название «Операционный усилитель» произошло от математиков, которые использовали их в аналоговых вычислительных машинах в качестве основного элемента решающих блоков (интеграторов, сумматоров и т. п.).

34. Между входными зажимами ОУ действует дифференциальный сигнал, коэффициент усиления которого в лучших промышленных образцах ОУ достигает значений 100… 120 дБ (10^5…10^6).

35. Между общей шиной и каждым входом ОУ действуют синфазные сигналы, которые в большинстве случаев применения ОУ являются помехами, коэффициент ослабления которых в лучших промышленных образцах ОУ достигает значений 100… 120 дБ (10^5…10^6).

36. Полоса пропускания ОУ в схеме инвертирующего усилителя определяется по уровню 0,707 амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) или (в децибелах) 20lg(0,707) = – 3 дБ.

37. В связи с возросшей доступностью ОУ как комплектующего компонента радиоэлектронной аппаратуры они используются в таких прецизионных устройствах как масштабирующие преобразователи, инструментальные усилители, активные фильтры, логарифмические усилители, компараторы, прецизионные выпрямители и др.

38. В общем случае цифровые устройства, оперирующие с двоичной (дискретной) информацией, подразделяются на два класса: комбинационные схемы — дискретные автоматы без памяти (логические элементы, шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры и др.) и последовательностные — дискретные автоматы с памятью (триггеры, счетчики и регистры). Под памятью подразумевается свойство устройства сохранять в течение требуемого времени значения сигналов, характеризующих внутреннее состояние цифрового устройства.

39. Базовыми логическими элементами являются инвертор (элемент НЕ: выходной сигнал Y = 1 при входном X = 0 и Y = 0, если X = 1), ИЛИ (логическое сложение — $Y = X_1 V X_2$ или $Y = X_1 + X_2$; для двух переменных характеризуется *таблицей истинности*: 0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1; 1 + 0 = 1; 1 + 1 = 1) и И (логическое умножение — $Y = X_1X_2$: 0·0 = 0; 0·1 = 0; 1·0 = 0; 1·1 = 1).

40. Составными логическими элементами являются ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (логическое сложение по модулю 2 — $Y = X_1 \oplus X_2$ (0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1; 1 + 0 = 0; 1 + 1 = 0) и логический элемент с тремя со-

стояниями выхода (Y = 0; Y = 1; Y = Z (выход отключен)). Первый элемент является компонентом арифметических сумматоров и кодеков (кодирующих и декодирующих устройств); второй — непременным компонентом вычислительных и автоматических систем с общей шиной (например, IBM PC, где шиной данных пользуются разнесенные по времени обращения винчестер, съёмные диски, мышь, клавиатура и т. п.).

41. В цифровых устройствах логические состояния представляются двумя уровнями напряжения (потенциалов): высоким, близким к напряжению источника питания, и низким, близким к нулю (так называемая потенциальная система представления информации). Длительность потенциальных сигналов определяется частотой смены информации, а переключающими импульсами служат перепады напряжения от одного уровня к другому.

Два уровня напряжения, характеризующие логические состояния, определяются просто как более высокий H (High — высокий) и низкий L (Low — низкий). Эти два значения называют логическими уровнями. Существуют два рода так называемых логических соглашений в зависимости от того, каким уровнем напряжения кодировать логическую 1 и логический 0. В соглашении *положительной логики* более высокий уровень напряжения (H) соответствует логической 1, а низкий (L) — логическому 0. В соглашении *отрицательной логики* — наоборот.

Элемент, выполняющий логические функции, можно оценивать с позиций как положительной, так и отрицательной логики. Его функциональная роль в обоих случаях будет различной. Это важное положение, которым часто пользуются на практике, вытекает из законов Де Моргана. Например, по правилам положительной логики (H = 1) элемент выполняет операцию И, а в отрицательной логике (H = 0) он действует как элемент ИЛИ. Это нетрудно установить из сопоставления таблиц истинности для этих элементов (см. п. 40).

42. Триггеры используются во многих узлах электронной аппаратуры в виде самостоятельных изделий или в качестве базовых элементов для построения других, более сложных устройств (счетчиков, регистров, запоминающих устройств). Общим свойством триггеров является способность длительно оставаться в одном из двух возможных устойчивых состояний, которые распознаются по значению их выходных напряжений.

Базовым триггером является RS-триггер с двумя устойчивыми состояниями, которые обеспечиваются за счет связи выхода каждого элемента с одним из входов другого. Один из выходов триггера называют *прямым* (в силу симметрии схемы им может быть любой) и обозначают буквой Q, а другой — *инверсным* и обозначают $\overline{Q}$ (в программе EWB — Q`). Состояние триггера часто отождествляется с сиг-

налом на прямом выходе, т. е. говорят, что триггер находится в единичном состоянии, если Q = 1, а Q` = 0, и в нулевом, если Q = 0, а Q` = 1. Смена состояний триггера производится внешними сигналами; этот процесс называют переключением, перебросом или опрокидыванием.

Свободные входы служат для управления и называются *информационными* или *логическими*. Информационный вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние (Q = 1; Q` = 0), называют *единичным* или S-входом (от англ. set — установка), а в нулевое (Q` = 0, Q = 1) — *нулевым* или R-входом (reset — возврат).

Более сложные схемы триггеров содержат RS-триггер и устройства управления, представляющие собой комбинационные устройства, преобразующие входную информацию в комбинацию сигналов, под воздействием которых триггер принимает одно из двух устойчивых состояний.

43. Счетчиком называют устройство, сигналы на выходе которого отображают число импульсов, поступивших на счетный вход. Например, одиночный JK- или D-триггер может служить примером простейшего счетчика: он считает до двух. Счетчик, образованный цепочкой из *m* триггеров, может подсчитать в двоичном коде 2^m импульсов. Каждый из триггеров такой цепочки называют *разрядом счетчика*. Число *m* определяет количество разрядов двоичного числа, которое может быть записано в счетчик. Число $К_{сч} = 2^m$ называют *коэффициентом* (*модулем*) *счета*.

Нулевое состояние всех триггеров принимается за нулевое состояние счетчика в целом. Остальные состояния нумеруются по числу поступивших входных импульсов. Когда число входных импульсов $N_{вх} > К_{сч}$, происходит переполнение, после чего счетчик возвращается в нулевое состояние и цикл повторяется.

44. В суммирующем счетчике каждый входной импульс увеличивает на единицу число, записанное в счетчик, при этом перенос информации из одного разряда в другой, более старший, происходит при смене состояния 1 на 0.

Вычитающий счетчик действует обратным образом: двоичное число, хранящееся в счетчике, с каждым поступающим импульсом уменьшается на единицу. Переполнение вычитающего счетчика происходит после достижения им нулевого состояния. Перенос из младшего разряда в старший здесь имеет место при смене состояния младшего разряда с 0 на 1.

Реверсивный счетчик может работать в качестве суммирующего и вычитающего. Режим работы определяется управляющими сигналами на дополнительных входах для задания направления счета.

Счетчики с последовательным переносом представляют собой цепочку триггеров, в которой импульсы, подлежащие счету, поступают

на вход первого триггера, а сигнал переноса передается последовательно от одного разряда к другому. Главное достоинство счетчиков — простота схемы; недостаток — сравнительно низкое быстродействие. Этого недостатка лишены более сложные счетчики с параллельным переносом, в которых срабатывание триггеров происходит синхронно, т. е. задержка переключения всего счетчика равна задержке одного триггера.

45. Регистры выполняются на синхронных триггерах D- или JK-типа. Занесение информации в регистр называют операцией ввода или записи. Выдача информации внешним устройствам характеризует операцию вывода или считывания. Все регистры подразделяются на накопительные (регистры памяти, хранения) и сдвигающие. Последние делятся на параллельные, последовательные и комбинированные (параллельно-последовательные и последовательно-параллельные), по направлению передачи (сдвига) информации — на однонаправленные и реверсивные.

46. Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) делятся на статические и динамические. В статических ОЗУ запоминание информации производится на триггерах, а в динамических — на конденсаторах емкостью порядка 0,5 пФ. При включенном питании длительность хранения информации в статических ОЗУ не ограничена, тогда как в динамических она ограничена временем саморазряда конденсатора, что требует специальных средств регенерации и дополнительных затрат времени на этот процесс (около 5—12% времени работы системы).

47. Постоянные запоминающие устройства (ROM или ПЗУ) делятся на четыре типа:

— масочные (ROM(M)), программируемые на заводе-изготовителе с применением специальных масок;

— однократно программируемые потребителем (PROM) путем пережигания нихромовых или поликремневых перемычек;

— многократно программируемые потребителем со стиранием записанной информации ультрафиолетовым излучением (EPROM или РПЗУ-УФ — репрограммируемые ПЗУ с ультрафиолетовым стиранием);

— многократно программируемые потребителем с электрическим стиранием информации (EEPROM (E^2PROM) или РПЗУ-ЭС.

48. Аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) применяются в информационно-измерительных системах, в технике связи, в цифровом телевидении, в бытовой технике и т. п. Под аналого-цифровым преобразованием понимается измерительный

процесс, включающий дискретизацию, квантование и кодирование *непрерывной* входной величины, которая может иметь бесконечно большое число значений и может быть непрерывной только по значению (например, по амплитуде) или только во времени. В ЦАП производится обратное преобразование.

49. Преимущества применения микроконтроллеров (МК) в системах управления: повышение технико-экономических показателей изделий (стоимость, надежность, потребляемая мощность, габаритные размеры), сокращение сроков их разработки и придания им принципиально новых потребительских качеств (расширение функциональных возможностей, модифицируемость, адаптивность и т. п.).

50. Типичная архитектура процессорного ядра МК: регистр-регистровая или RISC (Reduced Instruction Set Computer — компьютер с сокращенным набором команд), отличающаяся повышенным быстродействием.

51. Типичная архитектура организации памяти МК — гарвардская: предполагает раздельное использование памяти программ и данных, что позволяет микропроцессору (МП) работать одновременно как с памятью программ, так и с памятью данных, и тем самым увеличить производительность.

52. Критерии выбора МК: пригодность выбранного МК для решения поставленной задачи с учетом разрядности (8, 16, 32) и производительности (0,1… 200 MIPS), количества портов ввода/вывода (I/O), объема ОЗУ (RAM), ПЗУ (ROM), наличия часов реального времени; доступность: наличие МК в достаточных количествах, перспективы поставок в будущем, совместимость с МК, находящихся в стадии разработки; поддержка разработок: наличие программных (ассемблеры; компиляторы, симуляторы) и аппаратных средств поддержки (программаторы, эмуляторы, отладочные и оценочные модули); информационная поддержка: примеры применения и исходных текстов программ, квалифицированная консультация, виды связи с поставщиком и разработчиком, наличие научно-технической литературы на русском языке.

53. AVR микроконтроллеры компании Atmel (США). Звучная аббревиатура AVR, пестрящая в заголовках многочисленных русскоязычных книг по 8-разрядным МК фирмы Atmel и отсутствующая в официальных обозначениях таких МК, связана с именами двух студентов университета из 150-тысячного норвежского города Тронхейм Альфа Богена (Alf-Egil Bogen) и Вегарда Воллена (Vegard Wollen), которые разработали одну из самых удачных архитектуру МК и в 1995 году

предложили ее корпорации Atmel, известной своими «ноу-хау» в области Flash-памяти. Идея настолько понравилась руководству Atmel, что было принято решение незамедлительно инвестировать предлагаемый проект, в результате чего в 1996 году в Тронхейме был основан исследовательский центр Atmel, а во второй половине 1997-го корпорация приступила к серийному производству нового семейства МК, к их рекламной и технической поддержке.

54. Состав и назначение процессорного ядра AVR-МК: регистры общего назначения (РОН), арифметико-логическое устройства (АЛУ) и регистры управления; принимает из памяти программ коды команд и после декодирования выполняет их.

55. Память программ Flash ROM служит для хранения кодов команд управляющей программы МК; допускает многократное (около 10 тыс.) внутрисхемное стирание и запись информации с помощью SPI-интерфейса непосредственно в целевом изделии без извлечения из него МК.

56. Энергонезависимая память EEPROM используется для долговременного хранения различной информации (промежуточные данные, константы, коэффициенты), которая может изменяться в процессе функционирования МК-системы; исходные данные загружаются в EEPROM через SPI-интерфейс; число циклов стирание/запись составляет не менее 100 тысяч.

57. ОЗУ статического типа (Static RAM, SRAM) служит для хранения переменных управляющей программ; для большинства МК здесь располагается также стек.

58. Тактовый генератор AVR-МК определяет скорость работы МК и синхронизацию всех его функциональных узлов.

59. Последовательный порт AVR-МК — аналог COM-порта настольного ПК — служит для обмена данными с внешними устройствами, включая ПК, по двухпроводной линии связи.

60. Порты ввода/вывода AVR-МК имеют от 3 до 53 независимых линий вход/выход, каждая из которых может быть запрограммирована на вход или выход с общей нагрузочной способностью до 40 мА, что позволяет подключать непосредственно к МК светодиоды и биполярные транзисторы.

61. Таймер-счетчик общего назначения AVR-МК предназначен для формирования запроса прерывания по истечении заданного ин-

тервала времени (режим таймера) или накопления заданного числа событий (режим счетчика).

62. Сторожевой таймер AVR-МК предназначен для ликвидации последствий сбоя в ходе выполнения программы путем перезапуска МК.

63. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) AVR-МК содержит базовый 10-разрядный АЦП и регистры управления; для обслуживания нескольких датчиков, подключенных к соответствующим портам ввода/вывода, используется аналоговый мультиплексор (коммутатор) для подключения в заданной последовательности одного из датчиков ко входу базового АЦП.

64. Программные средства поддержки разработок на базе AVR-МК: бесплатная программа AVR Studio с поддержкой всех аппаратных отладочных средств, выпускаемых компанией Atmel и сторонними организациями.

65. Аппаратные средства поддержки разработок на базе AVR-МК: внутрисхемные программматоры (In-System Programmers); стартовые наборы разработчика (Starter Kits); внутрисхемные эмуляторы (In-Circuit Emulators); специализированные наборы.

Первая редакция — 05.10. 2011, вторая — 27.09.2014 г.