что совпадает с формулой, полученной проф. В.Н.Аксёновым [12], а также с [15,149] и проще выражения, приведенного для этого случая в [20] (в обозначениях автора)

$$tg\,\gamma = \frac{2 + \frac{R_i}{R_H}\sin\frac{2\pi}{m}}{\frac{2R_H}{R_i}\left(1+\frac{R_i}{R_H}\right)\left(1-\cos\frac{2\pi}{m}\right) - \frac{R_i}{R_H}\cos\frac{2\pi}{m}} .$$

Величины, необходимые для расчёта схем, определяют на основе полученных переменных без принципиальных затруднений с использованием известных приёмов. Их отыскание сопряжено лишь с довольно громоздкими выкладками.

§ 3.2. Получение расчётных величин, параметрические, нагрузочные, текущие относительные и внешние характеристики, обратное напряжение, номограммы и предельные режимы (х.х и к.з.)

А. Интегральные значения

1. Средние значения тока и напряжения полезной нагрузки

$$U_o = I_{(R)} = \frac{1}{\theta}\left[\int_0^{\gamma} i_{(k)}\,d\vartheta + \int_{\gamma}^{\theta} i_{(k^-)}\,d\vartheta\right] .$$

Подстановка тока из (3.9) с учётом смены индекса и преобразований даёт

$$U_o = I_{(R)} = \theta^{-1}\left[\frac{\sin\theta}{\cos\gamma}\,\frac{\cos(k\theta+\gamma)}{\cos(\theta-\gamma)} - \varepsilon P\right], \qquad (3.21)$$

$$P = (n\,tg\,\gamma + k^+\gamma)/y + [n\,tg(\theta-\gamma) + k(\theta-\gamma)]/y^- = f(k,n,m). \qquad (3.21')$$

Для упрощения записи опускаем индекс k у расчётных величин и у параметров n, $\mathcal{N}$, y, γ, а индекс R или z у токовых величин соответствует выбранному основанию сопротивлений. Для получения токовой нагрузочной характеристики достаточно воспользоваться коэффициентом перехода (1,9)

$$I_{(z)} = n\,U_o . \qquad (3.22)$$

При $\varepsilon = 0$ получаем выражение $U_o = I_{(R)} = \sin k\theta / y^{-}\theta \cos\gamma$ для относительно высоковольтных схем, приводимое в [153], а дополнительно при $k = 1$ и смене основания имеем

$$I_{(r+R)} = \theta^{-1} \sin\theta \, sc\gamma \; , \qquad (3.23)$$

что совпадает с формулой, приведенной для этого случая проф. В.Н.Аксёновым [12] (в обозначениях автора)

$$I_o = \frac{m}{\pi}\left[\sin\frac{\pi}{m}\cos\frac{\gamma}{2} + \frac{\cos\frac{\pi}{m}\sin\frac{\gamma}{2}}{1 + 2\frac{R_н}{r_{ф}}}\right]\frac{U_{2м}}{R_н + r_{ф}} \; .$$

С учётом (3.20′) из (3.23) находим в явном виде связь средних значений напряжения и сопротивления нагрузки (нагрузочные параметрические зависимости)

$$U_o = \sqrt{1 + N(1+N)(2\sin\theta)^2} \,/\, (1+n)(1+2N)\theta \leftarrow m \geqslant 3 \, , \qquad (3.23')$$

$$U_o = U_{o.xx} / (1+n) \leftarrow m = 1, 2 \; ; \; U^{(1)}_{o.xx} = \frac{1}{\pi} \; ; \; U^{(2)}_{o.xx} = \frac{2}{\pi} \; . \qquad (3.23'')$$

При $r = 0$ (т.е. $\gamma = 0$) из (3.23) получаем формулу, известную для m-фазных схем с чисто активной нагрузкой.

2. Действующее значение тока (напряжения) нагрузки.

Получаем, интегрируя (3.15) и преобразуя,

$$\mathcal{J}^2_{(R)} = \mathcal{U}^2_o = \frac{1}{\theta}\left[\int_0^{\gamma}(U_{o(k)})^2 d\vartheta + \int_{\gamma}^{\theta}(U_{o(k^-)})^2 d\vartheta\right] = \mathcal{D}_{(k)}/4\theta \, , \qquad (3.24)$$

$$\mathcal{D}_{(k)} = \mathcal{D}_o - 8\varepsilon\mathcal{D}_\varepsilon \; ; \; \mathcal{D}_o = (S^{(k)}_a/y)^2(2\gamma + \sin 2\gamma) + (S^{(k^-)}_a/y^-)^2[2(\theta-\gamma) + \sin 2(\theta-\gamma)] \, , \qquad (3.24')$$

$$\mathcal{D}_\varepsilon = k^+ S^{(k)}_a y^{-2} \sin\gamma + k S^{(k^-)}_a (y^-)^{-2} \sin(\theta-\gamma) - \frac{\varepsilon}{2}\left[(k^+/y)^2\gamma + (k/y^-)^2(\theta-\gamma)\right] . \qquad (3.24'')$$

При $\varepsilon = 0$, $k = 1$ и смене основания имеем

$$\mathcal{J}_{(r+R)} = \sqrt{\frac{1}{2}\left\{1 + \frac{\sin\theta}{2\theta\cos\gamma}\left[2\cos(\theta-\gamma) + 2\gamma\frac{\sin(\theta-2\gamma)}{\cos\gamma}\right]\right\}} \; ,$$

откуда при $r = 0$ ($\gamma = 0$) получаем известную формулу

$$\mathcal{J}_{(R)} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\sin 2\theta}{2\theta}\right)} \; .$$

3. Действующее значение тока вентиля (фазы).

При действиях, связанных с током вентиля, требуется учитывать не только изменение коммутационного подинтервала сверху вниз (в столбце) на диаграмме фэдс, но и слева направо (в строке). При статическом для фэдс начале координат из (3.17) и рис. 3.1,д замечаем, что начала координат у функций $U_{н(k)}$ и $U_{н(k^-)}$ изменяются в связи с их периодичностью внутри волны фэдс. Воспользовавшись теоремой смещения и обозначая для $м$ -го подинтервала k -й строки этот сдвиг, кратный периоду, в виде стрелки с указанием направления и величины смещения, получаем с учётом (3.17)

$$2\pi[J_{в(г)}]^2=\underbrace{\sum_{м=0}^{k}\int_{м2\theta-\gamma_k}^{м2\theta+\gamma_k}[S_{1(k)}-\overset{м2\theta}{\overrightarrow{U_{н(k)}}}]^2 d\vartheta}_{k^+\ раз}+\underbrace{\sum_{м=0}^{k^-}\int_{м2\theta+\gamma_k}^{м^+2\theta-\gamma_k}[S_{1(k)}-\overset{м2\theta}{\overrightarrow{U_{н(k^-)}}}]^2 d\vartheta}_{k\ раз} . \quad (3.25)$$

Представив правую часть (3.25) в виде трёх слагаемых $S_в$, $П_в$, $K_в$, находим

$$S_в=\sum_{м=0}^{k}\int_{м2\theta-\gamma_k}^{м2\theta+\gamma_k}[S_{1(k)}]^2 d\vartheta+\sum_{м=0}^{k^-}\int_{м2\theta+\gamma_k}^{м^+2\theta-\gamma_k}[S_{1(k)}]^2 d\vartheta=2\int_{-\gamma}^{k\theta}[S_{1(k)}]^2 d\vartheta ,$$

$$П_в=-2\Big[\sum_{м=0}^{k}\int_{м2\theta-\gamma_k}^{м2\theta+\gamma_k}S_{1(k)}\overset{м2\theta}{\overrightarrow{U_{н(k)}}}d\vartheta+\sum_{м=0}^{k^-}\int_{м2\theta+\gamma_k}^{м^+2\theta-\gamma_k}S_{1(k)}\overset{м2\theta}{\overrightarrow{U_{н(k^-)}}}d\vartheta\Big]=$$

$$=2\left(П_{1в}+П_{2в}+S_{1в}\right) ,$$

$$П_{1в}=\sum_{м=0}^{k}\int_{м2\theta-\gamma_k}^{м2\theta+\gamma_k}y^{-1}S_{1(k)}\overset{м2\theta}{\overrightarrow{S^{(k)}}}d\vartheta=\frac{2}{y}\int_0^{\gamma}[S^{(k)}]^2 d\vartheta ,$$

$$S_{1в} = \sum_{\mu=0}^{k} \int_{\mu 2\theta - \gamma_k}^{\mu 2\theta + \gamma_k} y^{-1} n \varepsilon S_{1(k)} d\vartheta + \sum_{\mu=0}^{k^-} \int_{\mu 2\theta + \gamma_k}^{\mu^+ 2\theta - \gamma_k} (y^-)^{-1} n \varepsilon S_{1(k)} d\vartheta =$$

$$= 2n\varepsilon \left[\frac{1}{y} \int_0^{\gamma} S^{(k)} d\vartheta + \frac{1}{y^-} \int_{\gamma}^{\theta} S^{(k^-)} d\vartheta \right],$$

$$K_в = \sum_{\mu=0}^{k} \int_{\mu 2\theta - \gamma_k}^{\mu 2\theta + \gamma_k} [\overrightarrow{U_{н(k)}}^{\mu 2\theta}]^2 d\vartheta + \sum_{\mu=0}^{k^-} \int_{\mu 2\theta + \gamma_k}^{\mu^+ 2\theta - \gamma_k} [\overrightarrow{U_{н(k^-)}}^{\mu 2\theta}]^2 d\vartheta =$$

$$= 2\left(k^+ \int_0^{\gamma} [U_{н(k)}]^2 d\vartheta + k \int_{\gamma}^{\theta} [U_{н(k^-)}]^2 d\vartheta \right),$$

$$П_{2в} = \sum_{\mu=0}^{k^-} \int_{\mu 2\theta + \gamma_k}^{\mu^+ 2\theta - \gamma_k} (y^-)^{-1} S_{1(k)} \overrightarrow{S^{(k^-)}}^{\mu 2\theta} d\vartheta = \frac{2}{y^-} \int_{\gamma}^{\theta} [S^{(k^-)}]^2 d\vartheta .$$

Выполнение указанных операций и преобразования дают

$$\mathcal{J}_{в(r)} = \mathcal{J}_{ф(r)} = \sqrt{\mathcal{D}_{в(k)}/4\pi}, \quad \mathcal{D}_{в(k)} = \mathcal{D}_{в0} - 8n^2 \varepsilon \mathcal{D}_{в\varepsilon}, \qquad (3.26)$$

$$\mathcal{D}_{в0} = 2(k\theta + \gamma) + \sin 2(k\theta + \gamma) - (S_a^{(k)}/y)^2 (2n + k^+)(2\gamma + \sin 2\gamma) -$$
$$- (S_a^{(k^-)}/y^-)^2 (2n + k) \cdot [\sin 2(\theta - \gamma) + 2(\theta - \gamma)], \qquad (3.26')$$

$$\mathcal{D}_{в\varepsilon} = -y^{-2} S_a^{(k)} \sin\gamma + (y^-)^{-2} S_a^{(k^-)} \sin(\theta - \gamma) - \tfrac{1}{2}\varepsilon [k^+ \gamma y^{-2} + k(\theta - \gamma)(y^-)^{-2}]. \qquad (3.26'')$$

Для частного случая $r = 0$, $\varepsilon = 0$ ($k = 1$; $\gamma = 0$) имеем для $m \geq 2$

$$\mathcal{J}_{в(R)} = \sqrt{\frac{1}{2m}\left(1 + \frac{\sin 2\theta}{2\theta}\right)} = \frac{1}{\sqrt{m}} \mathcal{J}_{(R)} .$$

Что касается мостовых схем, то для них по отношению к полученным результатам следует учитывать рекомендации, приведенные в

3. Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Получаем аналогично предыдущему

$$\mathcal{U}_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{2} + n_{TP}\left(n_{TP} J^{2}_{B(z)} + \frac{1}{2\pi} \mathcal{D}_{\varphi(k)}\right.} \quad , \qquad (3.27)$$

$$n_{TP} = z_{TP}/z = 1(1+n_{B})\ ; \quad n_{B} = z_{np}/z \quad , \qquad (3.27')$$

$$\mathcal{D}_{\varphi(k)} = y^{-1}(S_a^{(k)})^2(2\gamma + \sin 2\gamma) + (y^{-})^{-1}(S_a^{(k^-)})^2[2(\theta-\gamma) + \sin 2(\theta-\gamma)] -$$
$$-2(k\theta+\gamma) - \sin 2(k\theta+\gamma) + \mathcal{E}2n[y^{-1}S_a^{(k)}\sin\gamma + (y^{-})^{-1}S_a^{(k^-)}\sin(\theta-\gamma)] . \qquad (3.27'')$$

При $z_{TP} = 0$ величина $\mathcal{U}_{\varphi} = 0{,}7071$, что иногда используется независимо от сопротивления фазы трансформатора и при строгом подходе ошибочно.

Б. Алгебраические значения

4. Амплитуду тока вентиля (фазы) получаем из (3.17), имея в виду, что по времени она совпадает с амплитудой исходной (первой) эдс и для этого момента μ-й подинтервал k-й строки непосредственно выражается через k

$$i_{aB(z)} = 1 - \frac{\sin a_k\theta/\sin\theta + n\mathcal{E}}{n + a_k}\ ; \quad a_k = k + \frac{1+(-1)^k}{2} \ . \qquad (3.28)$$

5. Среднее значение тока вентиля (фазы)

$$I_{B(z)} = \frac{1}{m} I_{(z)} \ . \qquad (3.29)$$

6. Пульсации, определяемые как относительный размах,

$$\Delta\bar{U}_{(k)} = \Delta U_{(k)}/U_0 \ ; \quad \Delta\bar{U}_{(k^-)} = \Delta U_{(k^-)}/U_0 \quad , \qquad (3.30)$$

$$\Delta U_{(k)} = U_{ao(k)} - U_{no} = y^{-1} S_a^{(k)}(1-\cos\gamma) \quad , \qquad (3.30')$$

$$\Delta U_{(k^-)} = U_{ao(k^-)} - U_{no} = (y^{-})^{-1} S_a^{(k^-)}[1-\cos(\theta-\gamma)] \ , \qquad (3.30'')$$

где амплитудные (индекс a) и минимальные (индекс n) значения напряжения полезной (индекс ноль) нагрузки определяются из (3.15) при $\vartheta=0$ для k-х и при $\vartheta=\theta$ для k^--х значений.

7. Пульсации, определяемые как относительное действующее значение переменной составляющей тока нагрузки

$$\Delta U_\sim = J_\sim / I = \sqrt{(U_\circ / U_\circ)^2 - 1} \,, \qquad (3.31)$$

$$J_{\sim(R)} = U_\circ \Delta U_\sim \,. \qquad (3.31')$$

8. Обратное напряжение на вентиле:

в точках минимумов напряжения на нагрузке

$$U_{обр.\nu} = 2\sin[(k+\nu)\theta + \tfrac{1}{2}(\gamma \mp \gamma)]\sin[\nu\theta - \tfrac{1}{2}(\gamma \pm \gamma)] - \varepsilon \,, \qquad (3.32)$$

$$\nu = 0, 1, \ldots, \nu_x \,; \; \nu_x = \tfrac{1}{2}\{m - k^- + \tfrac{1}{2}[(-1)^m + (-1)^k]\} = f(m,k), \qquad (3.32')$$

где для каждого значения ν, соответствующего двум смежным точкам, вначале берутся верхние знаки в выражении (3.32), затем нижние, а значение ν_x, найденное с учётом результатов, приведенных в § 2.3,б, зависит от m и k;

в точках максимумов напряжения на нагрузке

$$U_{обр.\mu} = [(\sin \theta_\mu \theta / \sin\theta) - \theta_\mu \theta] / (n + \theta_\mu) - \cos(\mu + k)\theta \,, \qquad (3.33)$$

$$\theta_\mu = k + \tfrac{1}{2}[1 + (-1)^\mu] = f(\mu, k) \,; \; \mu = 1, 2, \ldots, \mu_x \,; \; \mu_x = m - k \,. \qquad (3.33')$$

Аналогично для тока вентиля в тех же точках

$$i_{\theta\nu(z)} = i_{\theta(z)}(\nu 2\theta \mp \gamma) = 2\sin(\nu\theta + \frac{\gamma \mp \gamma}{2})\sin[(k-\nu)\theta + \frac{\gamma \pm \gamma}{2}] \,, \qquad (3.34)$$

$$\nu = 0, 1, 2, \ldots, \nu_x \,; \; \nu_x = \tfrac{1}{4}[2k - 1 + (-1)^k] = f(k) \,, \qquad (3.34')$$

$$i_{\theta\mu(z)} = i_{\theta(z)}(\mu\theta) = \cos(k-\mu)\theta - \frac{\sin\theta_\mu \theta / \sin\theta + n\varepsilon}{n + \theta_\mu} \,; \; \mu = 0, 1, \ldots, k. \qquad (3.35)$$

Максимально возможное значение обратного напряжения (амплитуда), необходимое для выбора вентиля, определяется для чётных m из (3.33) при $\mu = \mu_x$. Максиморум амплитуды имеет место в режиме х.х и равен для любых m:

$$U_{обр.xx} = 2\cos[(-1)^m - 1]\frac{1}{4}\theta - \varepsilon . \qquad (3.36)$$

Отметим, что по действующим значениям токов и напряжений, по амплитуде и форме тока вентиля и обратного напряжения (т.е. по величинам, связанным с наиболее сложными и громоздкими выкладками) можно получить более простые приближенные выражения, положив выходное напряжение равным среднему значению. Погрешности, при этом получаемые, в сравнении с точными решениями незначительны и приемлемы для практики. Однако, поскольку ниже даны численные решения по точным формулам, упрощенные здесь не приводятся.

В. Текущие относительные характеристики.

К другим, кроме приведенных выше пульсаций, текущим относительным величинам могут быть отнесены [11,12,19,25,27,30,31,165,177] :

1. Отношения, принадлежащие нагрузке,

а/ пик-фактор нагрузки

$$k_{по} = U_{ao(k,k^-)} / U_o , \qquad (3.37)$$

б/ коэффициент формы тока нагрузки

$$k_{ф} = \bar{J}_o = J_o / I = U_o / U_o ,$$

в/ коэффициент мощности нагрузки

$$\bar{P}_{пол} = P_{пол(R)} / P_{(R)} = U_o^2 / U_o^2 = \bar{J}_o^2 . \qquad (3.38)$$

Тогда (3.31) переписывается как $\Delta U_{\sim} = \sqrt{\bar{P}_{пол} - 1}$.

2. Отношения, принадлежащие вентилю,

а/ коэффициенты

$$\bar{I}_в = I_в / I = 1/m ; \; D_в = J_{в(r)} / I_{(r)} ; \; F = i_{ав(r)} / I_{(r)} , \qquad (3.39)$$

б/ пик-фактор вентиля

$$k_{пв} = i_{ав(r)} / I_{в(r)} = m k_{по} , \qquad (3.40)$$

в/ коэффициент формы тока вентиля

$$k_{фв} = \mathcal{I}_{в(г)} / I_{в(г)} = m D_в \quad , \qquad (3.41)$$

г/ коэффициент амплитуды обратного напряжения

$$O = \mathcal{U}_{обр.xx} / U_{o.xx} \; ; \; U_{o.xx} = \theta^{-1} \sin\theta - \varepsilon \, , \qquad (3.42)$$

д/ относительная мощность потерь вентиля по прямому току

$$\bar{\mathcal{P}}_{в.пр} = \mathcal{P}_{в.пр(г)} / P_{(г)} = n_{пр} D_в^2 + \frac{1}{m} \bar{\varepsilon} \quad , \qquad (3.43)$$

где относительное (по нагрузке) напряжение смещения

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon / U_o = E_s / \underline{U}_o \; , \qquad (3.44)$$

мощность потерь вентиля по прямому току [69]

$$\mathcal{P}_{в.пр(г)} = n_{пр} \mathcal{I}_{в(г)}^2 + I_{в(г)} \varepsilon \; , \; n_{пр} = r_{пр} / r \, , \qquad (3.45)$$

или в именованных единицах

$$\underline{\mathcal{P}}_{в.пр} = E_s \underline{I}_в + r_{пр} \underline{\mathcal{I}}_в^2 \quad . \qquad (3.46)$$

Если по обратной ветви представить характеристику вентиля в форме, аналогичной рис. 3.1,а, с током смещения $\underline{I}_s$ и эквивалентной проводимостью $g_{обр}$, то мощность $\underline{\mathcal{P}}_{в.обр}$ после интегрирования $\underline{u}_{обр} (\underline{I}_s + g_{обр} \underline{u}_{обр})$ можно найти из выражения, аналогичного (3.46), по среднему $\underline{U}_{обр}$ и действующему $\underline{\mathcal{U}}_{обр}$ значениям обратного напряжения

$$\underline{\mathcal{P}}_{в.обр} = \underline{I}_s \underline{U}_{обр} + g_{обр} \underline{\mathcal{U}}_{обр}^2 \; . \qquad (3.47)$$

Определение обратных потерь представляет довольно трудоемкую задачу. Поэтому их можно рассчитать приближенно, предполагая обратный ток состоящим из тока насыщения. Экспоненциальная зависимость обратного тока от температуры оказывает влияние на очень быстрое увеличение обратных потерь с температурой. Однако, даже при таком быстром росте их абсолютная величина, например, для кремниевых вентилей составляет около 5% от прямых потерь при номинальной нагрузке [182]. Поэтому в широкой практике обратными потерями обычно пренебрегают.

е/ коэффициент относительной мощности вентиля

$$\xi_{в} = \mathcal{P}_{в.пр(z)} / \mathcal{P}_{пол(z)} = \mathcal{P}_{в.пр(z)} / n\,\mathcal{U}_o^2 \;. \qquad (3.48)$$

3. Отношения, принадлежащие трансформатору,

а/ коэффициенты действующих значений напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора (фазы)

$$B = \bar{\mathcal{U}}_{ф} = \mathcal{U}_{ф} / U_o \;; \quad D_{ф} = \bar{\mathcal{J}}_{ф} = \mathcal{J}_{ф(z)} / I_{(z)} \;, \qquad (3.49)$$

б/ коэффициенты использования вторичной обмотки и трансформатора в целом относительно условной и полезной мощности

$$k_{исп\,\bar{II}(1)} = \mathcal{P}_{\bar{II}(R)} / P_{(R)} = D_{ф} B = \frac{1}{m} k_{фв} B \,; \; k'_{исп\,\bar{II}(1)} = \mathcal{P}_{\bar{II}(R)} / \mathcal{P}_{пол(R)} = \frac{\mathcal{J}_{ф(z)} \mathcal{U}_{ф}}{n\,\mathcal{U}_o^2} \,, \qquad (3.50)$$

$$k_{исп.тр} = \mathcal{P}_{тип(R)} / U_o^2 \;; \; k'_{исп.тр} = \mathcal{P}_{тип(R)} / \mathcal{U}_o^2 \,, \qquad (3.51)$$

где типовая мощность складывается из мощностей первичных и вторичных обмоток

$$\mathcal{P}_{тип} = \frac{1}{2} \left(\sum_1^{m_1} \mathcal{P}_{iI} + \sum_1^{m_2} \mathcal{P}_{i\bar{II}} \right), \qquad (3.52)$$

в/ коэффициент использования амплитуды фэдс

$$\bar{S}_a = S_a / \underline{U}_o = 1 / U_o \quad , \qquad (3.53)$$

г/ коэффициент относительной мощности трансформатора

$$\xi_{тр} = \mathcal{P}_{тр(z)} / \mathcal{P}_{пол(z)} \;, \qquad (3.54)$$

где мощность потерь в обмотках трансформаторе

$$\mathcal{P}_{тр(z)} = m\, r_{тр}\, \mathcal{J}^2_{ф(z)} \;. \qquad (3.55)$$

4. Коэффициент относительной мощности выпрямителя

$$\xi = V \xi_{в} + \xi_{тр} \;, \qquad (3.56)$$

где V - общее число вентилей для каждого из которых определен коэффициент (3.48). При $V = m$ имеем

$$\xi = \frac{m n}{\mathcal{J}^2_{(z)}} \left(\mathcal{J}^2_{в(z)} + I_{в(z)} \varepsilon \right). \qquad (3.56')$$