

Теорія репульсионныхъ моторовъ.

Настоящая статья представляетъ попытку дать теорію репульсионнаго мотора съ точки зрѣнія поперечнаго поля, создаваемого роторомъ. Подобное разложеніе вращающагося поля, аналогичное разложенію Potier, Görges'a и Sumec'a въ однофазномъ асинхронномъ моторѣ, представляетъ, по мнѣнію автора, большія преимущества передъ разложеніемъ обмотки статора, въ смыслѣ большей ясности процесса и удобства постоянныхъ, и имѣетъ, какъ ему кажется, не одинъ только математическій смыслъ.

Круговыя діаграммы, дающія такую рельефную картину свойствъ мотора и предубаженія для конструктора, получили послѣ извѣстной статьи Ossan'a широкое распространеніе; поэтому настоящая статья посвящена собственно полученію и изслѣдованію круговой діаграммы репульсионнаго мотора, охватывая вмѣстѣ съ тѣмъ все его свойства, за исключеніемъ коммутациі, которой авторъ надѣется посвятить слѣдующую статью. При полученіи круговой діаграммы приняты во вниманіе сдвигъ фазъ между намагничивающимъ токомъ и магнитнымъ потокомъ; бóльшая точность діаграммы и возможность учета потерь въ желѣзѣ какъ результатъ этого, искупаютъ, по мнѣнію автора, сложность формулъ.

Въ дальнѣйшемъ приняты слѣдующія обозначенія:

R_1 напряженіе на клеммахъ статора,

$E_{ст} = E_1$ — электродвижущая сила пульсациі въ обмоткѣ статора.

$E_2 = E_{nc_1}$ „ „ „ „ продольной катушкѣ ротора отъ продольнаго потока,

E_{nc_2} — электродв. сила пульсациі въ поперечной катушкѣ ротора отъ поперечнаго поля,

$E_{вр.1}$ эллектродв. сила вращенія продольной катушки ротора въ поперечномъ полѣ,

$E_{вр.2}$ электродв. сила вращенія поперечной катушки ротора въ продольномъ полѣ,

Φ_{nd} магнитный потокъ продольный,

Φ_{np} „ „ поперечный,

B_1, B_{nd}, B_{nr}, B_2 — наибольшія индукціи: общаго продольнаго, поперечнаго и результирующаго полей ротора,

J_1, J_2, J_a — первичный, вторичный и намагничивающій токи,

r_1, x_1 и $z_1 = r_1 - jx_1$ — омическое, реактивное и кажущееся сопротивление обмотки статора,

r_2, x_2 и $z_2 = r_2 - jx_2$ — омическое, реактивное и кажущееся сопротивление обмотки ротора,

g_a, b_a и $y_a = g_a + jb_a$ — проводимость ваттнаго, безваттнаго и кажущаяся проводимость тока возбужденія,

g_{nr}, b_{nr} и $y_{nr} = g_{nr} + jb_{nr}$ — проводимость ваттнаго, безваттнаго и кажущаяся проводимость поперечной катушки ротора,

$x_{nd}, x_{nr} = \frac{1}{b_{nr}}$ — реакція продольной, поперечной катушки ротора,

$x_3 = x_{nr} \cos \gamma, x_4 = x_{nd} \cos \gamma, x_s = x_1 + x'_2, x_{II} = x_3 + x'_2, x_{III} = x_4 + x'_2 + x'_2,$

$W_1 = P_1 J_1 \cos \varphi_1$ — мощность, получаемая статоромъ,

W_a — мощность, получаемая роторомъ,

W_2 — ” отдаваемая роторомъ,

$V_1 = J_1^2 r_1$ — омическія потери статора,

$V_2 = J_2^2 r_2$ — ” ” ротора,

$V_{a,1}, V_{a,2}$ — потери въ желѣзѣ отъ продольнаго и поперечнаго полей,

φ_1 — уголъ сдвига фазъ между P_1 и J_1 ,

ψ — ” ” ” ” E_1 и J_1 ,

$\psi_{2,v}$ — ” ” ” ” E_2 и J_2 ,

γ — ” ” ” ” b_a и y_a, b_{nr} и y_{nr} ,

ψ_1 — ” ” ” ” r_1 и z_1 ,

τ — полюсный шагъ,

λ — уголъ сдвига щетокъ отъ продольной оси мотора,

β_1 — отношеніе ширины обмотки статора къ τ ,

β_2 — отношеніе ширины обмотки ротора, находящейся въ предѣлахъ угла $180 - 2\lambda$ къ τ ,

$\beta_3 = 1 - \beta_2$ — отношеніе ширины обмотки ротора, находящейся въ предѣлахъ угла 2λ къ τ ,

β_4 — отношеніе ширины обмотки ротора, находящейся въ предѣлахъ угла $180 - \lambda$ къ τ ,

$c_1 = \frac{E_{вр.2} \sin \alpha_{р.}}{E_{нс.1}}$ — отношеніе электродв. силы вращенія $E_{вр.2}$ при синхронной скорости къ электродв. силѣ пульсаціи $E_{нс.1}$,

$c_2 = \frac{E_{вр.1} \sin \alpha_{р.}}{E_{нс.2}}$ — отношеніе электродв. силы вращенія $E_{вр.1}$ при синхронной скорости къ электродв. силѣ пульсаціи $E_{нс.2}$,

ω_1 число періодовъ первичной цѣпи,

n_2 — число оборотовъ ротора въ минуту,

$\omega_2 = \frac{n_2}{60}$ — число періодовъ вращенія,

$v = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ — отношеніе чиселъ періодовъ пульсаціи и вращенія,

$u = \frac{E_1}{E_2}$ — коэффициентъ трансформаци,

N_1, N_2, N_{nd}, N_{nr} — число стержней статора, ротора, его продольной и поперечной катушекъ,

$\nu = \frac{N_2}{2\tau}$ — удѣльное число стержней,

$w_2 = \frac{N_1}{2}$ число витковъ статора,

$w_2 = \frac{N_2}{2}$ — число витковъ ротора,

M_{nd} — моментъ продольнаго поля съ поперечной катушкой,

M_{nr} — „ „ поперечнаго поля съ продольной катушкой,

M — результирующій моментъ,

D — діаметръ ротора,

l — длина ротора,

ρ, ξ_0, η_0 съ соотвѣтствующими значками радіусъ и координаты центра различныхъ окружностей,

R, X, Z, Y съ соотвѣтствующими значками дѣйствующія сопротивленіе, реакція, кажущееся сопротивление и кажущаяся проводимость различныхъ цѣпей,

m, n, p, q — масштабы круговъ K_p''' , K_p'' , K_p' и K_p .

Буква со значкомъ ' означаетъ соотвѣтствующую величину, приведенную къ первичной цѣпи; на примѣръ J_2' — токъ ротора, приведенный къ первичной цѣпи. Буква съ точкой внизу означаетъ величину въ символическомъ обозначеніи.

Всѣ формулы относятся къ двуполосному мотору, ибо перевести ихъ на многополосный не представляетъ никакого труда.

Здѣсь принято допущеніе пропорціональности поперечнаго потока Φ_{nr} вторичному току J_2 , а также имѣютъ мѣсто обычныя допущенія: синусоидальности тока, распределенія обмотки въ видѣ равномернаго слоя и пр..

Разсмотримъ якорь мотора постоянного тока (рис. 1-а), по которому черезъ щетки течетъ токъ отъ посторонняго источника въ направленіи, указанномъ на рисункѣ. Этотъ якорь создаетъ магнитное поле Φ въ направленіи ab . Разложимъ мысленно его обмотки на двѣ катушки $ahf-egb$, назовемъ ее продольной, и $ace-fdb$, которую назовемъ поперечной. Соответственно этому и треугольное поле ротора abc (рис. 1-б) разложится на два трапециoidalныхъ: продольное Φ_{nd} (defg рис. 1-б) съ направленіемъ cd , создаваемое продольной катушкой, и поперечное Φ_{nr} (hiklmn рис. 1-б) съ направленіемъ hg , создаваемое поперечной катушкой. Поле Φ_{nd} съ поперечной катушкой даетъ моментъ $M_{nd} = k \cdot B_{nd} \cdot N_{nr} \cdot J_2$ (гдѣ k нѣкоторая постоянная), направленный противъ часовой стрѣлки, поле же Φ_{nr} съ продольной катушкой моментъ $M_{nr} = k \cdot B_{nr} \cdot N_{nd} \cdot I_2$, направленный по часовой стрѣлкѣ. Не трудно видѣть, что, пока проницаемость пространства, окружающаго якорь, одинакова по всѣмъ направленіямъ, эти моменты взаимно уравновѣшиваются, такъ какъ $\frac{B_{nd}}{B_{nr}} = \frac{N_{nd}}{N_{nr}}$, и якорь находится въ покоѣ, но стоитъ лишь одной изъ этихъ катушекъ противопоставить желѣзныя массы, напримѣръ въ видѣ полюсовъ, какъ это показано пунктиромъ на рис. 1-а, какъ B_{nd} увеличивается, M_{nd} становится

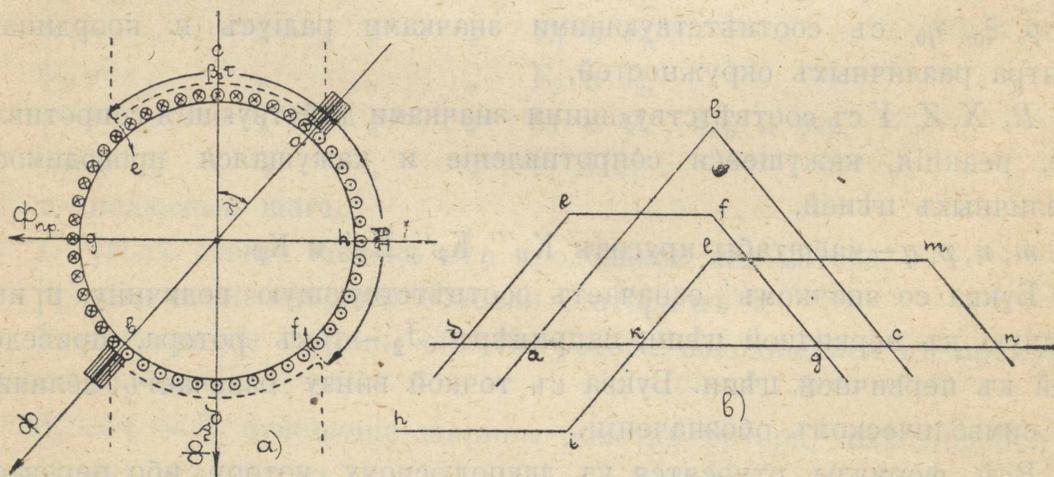


Рис. 1.

больше M_{nr} , и якорь начинаетъ вращаться въ сторону, противоположную движенію часовой стрѣлки (неупотребляемый реактивный моторъ постоянного тока). Если на этихъ полюсахъ нанесена обмотка, создающая поле, направленное противоположно Φ_{nd} , то моменты M_{nd} и M_{nr} дѣйствуютъ уже въ одну сторону, и моторъ начинаетъ вращаться по направленію часовой стрѣлки (обыкновенный моторъ постоянного тока). Такъ какъ въ подобныхъ моторахъ противъ поперечной ка-

тушки нѣтъ вблизи желѣзныхъ массъ, то моментъ M_{np} здѣсь очень малъ по сравненію съ M_{nd} , и такимъ образомъ эти двигатели, а, слѣдовательно, и всѣ моторы постоянного тока относятся къ классу моторовъ съ продольнымъ полемъ.

Однофазные коллекторные двигатели имѣютъ также представителя этого класса въ лицѣ послѣдовательнаго мотора. Но здѣсь существуетъ и другой классъ двигателей, у которыхъ доминирующую роль играетъ моментъ не поперечной катушки въ продольномъ полѣ, а, наоборотъ, продольной катушки въ поперечномъ полѣ; это такъ называемые репульсионные двигатели. Сюда относятся моторъ Томсона (рис. 2), моторъ Дери (рис. 3) и моторъ Аткинсона (рис. 4).

Эти двигатели выполняются обыкновенно съ равномернымъ между-желѣзнымъ пространствомъ и распределенной обмоткой. Обмотка ротора коротко замкнута подвижными щетками (двигатели Томсона и Аткинсона) или парой неподвижныхъ и парой подвижныхъ (двигатель

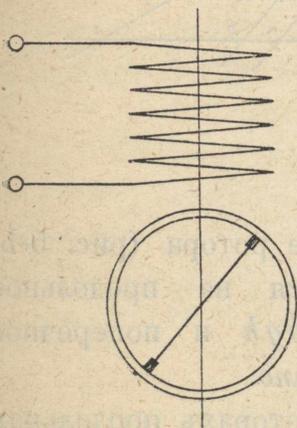


Рис. 2.

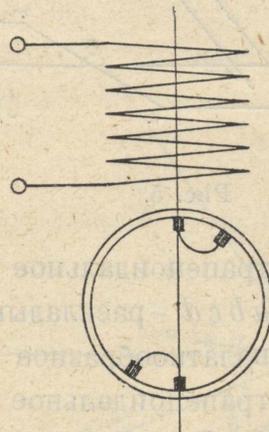


Рис. 3.

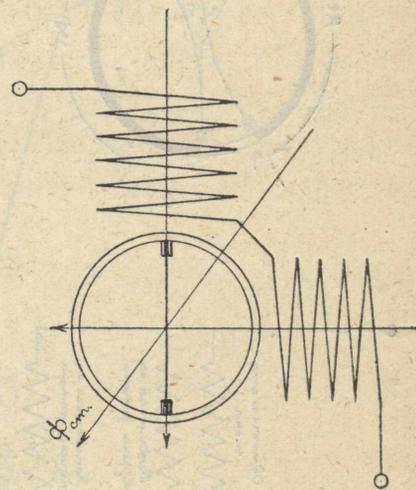


Рис. 4.

Дери). Обмотка статора присоединяется непосредственно къ сѣти и представляетъ первичную обмотку трансформатора, вторичную обмотку котораго представляетъ продольная катушка ротора. Въ моторѣ Томсона она ($ahf-egb$) получается, какъ коаксальная съ катушкой статора отъ точки прикосновенія щетокъ (рис. 1-а) и содержитъ $\beta_2 N_2$ стержней; въ моторѣ Аткинсона подобнымъ же образомъ по отношенію къ результирующему полю $\Phi_{ст}$ (рис. 4) изъ полей обѣихъ обмотокъ статора. Поперечная катушка въ этихъ моторахъ является дополненіемъ продольной и содержитъ $\beta_3 N_2$ стержней. Въ моторѣ Дери обмотка ротора раскладывается также на продольную и поперечную катушки, но только болѣе сложнымъ способомъ. Не трудно видѣть, что на частяхъ np и qr (рис. 5-а) тока нѣтъ, поэтому мы можемъ

катушку $psr-qt n$ разложить на продольную, занимающую всю окружность и имѣющую на пространствах ps и tq удѣльное число стержней $\nu = \frac{N_2}{2\tau}$ и на пространствах tnp и qrs удѣльное число стержней $\nu = \frac{N_2}{2\tau}$, и поперечную, занимающую пространство tnp и qrs и имѣющую удѣльное число стержней $\nu = \frac{N_2}{2\tau}$. Такъ какъ на частяхъ np и qr токи въ продольной и поперечной катушкахъ направлены въ противоположныя стороны, то при наложеніи, они даютъ катушку $psr-qt n$ съ удѣльнымъ числомъ стержней $\nu = \frac{N_2}{2\tau}$. Соответственно съ этимъ

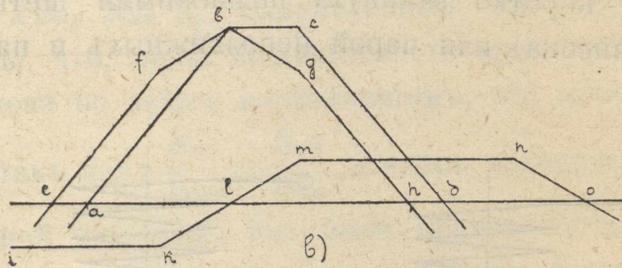
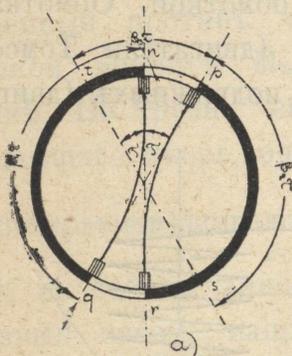


Рис. 5.

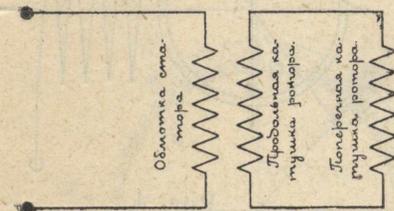


Рис. 6.

трапецидальное поле ротора (рис. 5-b) $abcd$ раскладывается на продольное палаткообразное $efbgh$ и поперечное трапецидальное $iklmno$.

Во всѣхъ этихъ моторахъ продольная и поперечная катушки представляютъ изъ себя замкнутую цѣпь (рис. 6).

2. Диаграмма напряженій.

Разсмотримъ электродв. силы, индуктирующіяся въ этихъ моторахъ. Пока моторъ стоитъ, въ продольной катушкѣ ротора индуктируется только электродв. сила пульсаціи продольного потока Φ_{nd} , — E_{nc1} , которая уравнивается электродв. силой пульсаціи поперечнаго потока Φ_{nr} въ поперечной катушкѣ E_{nc2} , паденіемъ напряженія отъ реакціи — $J_2 x_2$, и отъ омическаго сопротивленія — $J_2 r_2$, всей вторичной цѣпи. Когда роторъ находится въ движеніи, сюда присоединяются электродв. сила вращенія поперечной катушки въ продольномъ полѣ — E_{vr2} и продольной катушки въ поперечномъ полѣ — E_{vr1} .

Пусть $O\Phi_{nd}$ (рис. 7) представляет векторъ продольнаго магнитнаго потока, электродв. сила пульсаціи $E_{лс1}$ отстаеъ отъ него на уголъ въ 90° и представляется векторомъ Oa ; электродв. сила вращения— $E_{вр2}$ въ фазѣ съ $O\Phi_{nd}$ —векторомъ ab . Пусть далѣе $O\Phi_{nr}$ векторъ поперечнаго потока, тогда векторъ вторичнаго тока OJ_2 будетъ опережать его на уголъ $\gamma = \text{arctg} \frac{g_{nr}}{b_{nr}}$, гдѣ g_{nr} проводимость ваттнаго, а b_{nr} —безваттнаго токовъ поперечной катушки, и діаграмма вторичной цѣпи заканчивается слѣдующими четырьмя векторами: 1) bc —электродв. силы пульсаціи $E_{лс.2} = J_2 \cos \gamma$, $x_{nr} = \frac{J_2 \cos \gamma}{b_{nr}}$ подѣ угломъ въ 90° къ $O\Phi_{nr}$, 2) Oe —электродв. силы вращения $E_{вр.1}$ въ фазѣ съ $O\Phi_{nr}$, 3) cd —

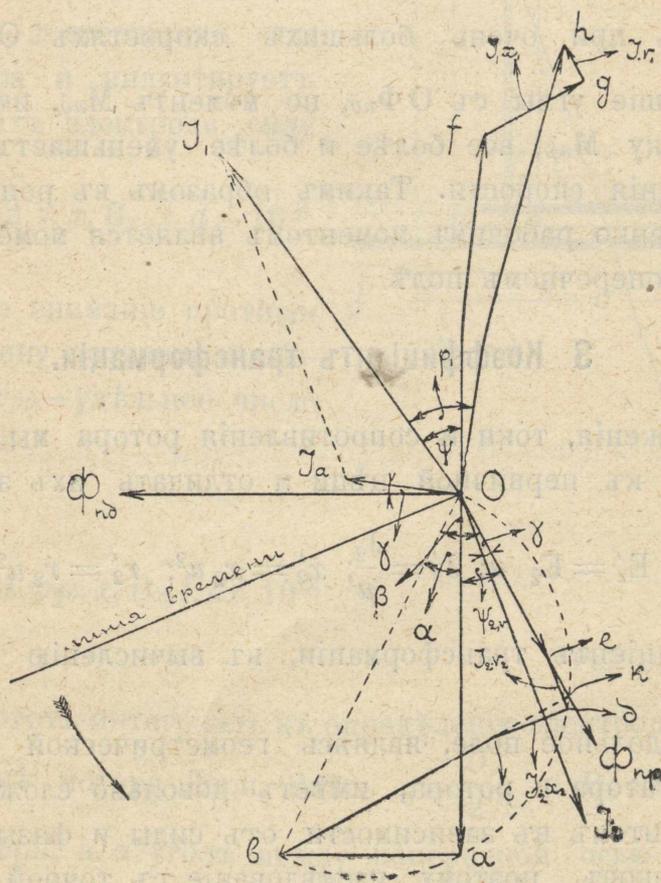


Рис. 7.

паденія напряженія отъ реакціи разсѣянія въ квадратурѣ съ токомъ и 4) ed паденія напряженія отъ омическаго сопротивленія въ фазѣ съ токомъ.

Діаграмма статора ничѣмъ не отличается отъ діаграммы трансформатора. Векторъ намагничивающагося тока OJ_a опережаетъ магни^T

ный потокъ на уголъ $\gamma = \arctg \frac{g_a}{b_a}$ (при чемъ, конечно, $\frac{g_a}{b_a} = \frac{g_{np}}{b_{np}}$), векторъ первичнаго тока OJ является геометрической суммой OJ_2 и OJ_a . Векторъ напряженія на клеммахъ OP_1 складывается изъ: 1) вектора электродв. силы пульсаціи OE_1 , 2) паденія напряженія отъ реакціи первичнаго разслѣдованія $J_1 x_1 - fg$ и 3) паденія напряженія отъ омическаго сопротивленія $J_1 r_1 - gh$.

При пускѣ въ ходъ, такъ какъ $Oe = 0$, векторъ OJ_2 , составляетъ небольшой уголъ съ векторомъ $O\Phi_{nd}$, моменты M_{nd} и M_{np} складываются и оба имѣютъ значительную величину, такъ какъ OJ_2 при пускѣ въ ходъ значительно больше нормальнаго. Поэтому репульсионные моторы берутъ съ мѣста съ большимъ моментомъ. При нормальной скорости M_{nd} очень малъ, т. к. OJ_2 составляетъ съ $O\Phi_{nd}$ уголъ близкій къ $\frac{\pi}{2}$, при очень большихъ скоростяхъ OJ_2 составляетъ опять небольшіе углы съ $O\Phi_{nd}$, но моментъ M_{nd} , имѣя здѣсь знакъ обратный знаку M_{np} , все болѣе и болѣе уменьшаетъ послѣдній по мѣрѣ возрастанія скорости. Такимъ образомъ въ репульсионныхъ моторахъ собственно рабочимъ моментомъ является моментъ продольной катушки въ поперечномъ полѣ.

3 Коэффициентъ трансформаціи.

Всѣ напряженія, токи и сопротивленія ротора мы будемъ считать приведенными къ первичной цѣпи и отличать ихъ значкомъ'. Такъ

$$E'_2 = E_2 \cdot u; J'_2 = \frac{J_2}{u}; x'_2 = x_2 u^2; r'_2 = r_2 u^2,$$

гдѣ u коэффициентъ трансформаціи, къ вычисленію котораго мы и обращаемся.

Общее продольное поле, являясь геометрической суммой фиктивныхъ полей статора и ротора, имѣетъ довольно сложную форму, мѣняющуюся притомъ въ зависимости отъ силы и фазы первичнаго и вторичнаго токовъ, поэтому изслѣдованіе съ точной формой поля чрезвычайно затруднительно. Вмѣстѣ съ тѣмъ благодаря вліянію насыщенія желѣза оно совсѣмъ не такъ точно, какъ это можетъ казаться на первый взглядъ. Поэтому, мы не дѣлая большой ошибки, но выигрывая чрезвычайно въ простотѣ, можемъ допустить, что это поле имѣетъ синусоидальную форму.

На рис. 8 синусоида abc представляетъ общее продольное пульсирующее во времени поле, обмотка статора представлена разверну-

той въ видѣ слоя $p q$, заполненнаго на части $\beta_1 \tau$; слой $r s$ въ моторахъ Томсона и Аткинсона на части $g h = \beta_2 \tau$ занимает продольная катушка, а на части $f g = \beta_3 \tau = (1 - \beta_2) \tau$ поперечная съ одинаковымъ удѣльнымъ числомъ стержней. Для мотора же Дери продольная катушка занимает весь слой $r s$, на части $g h = \beta_2 \tau$ съ удѣльнымъ числомъ стержней $\nu = \frac{N_2}{2\tau}$ и на частяхъ $i g$ и $h k$ равныхъ $\frac{\beta_3 \tau}{2} =$

$= (1 - \beta_2) \frac{\tau}{2}$ съ удѣльнымъ числомъ стержней $\nu = \frac{N_2}{4\tau}$, а поперечная катушка часть $f g = \beta_3 \tau = (1 - \beta_2) \tau$ съ удѣльнымъ числомъ стержней $\nu = \frac{N_2}{4\tau}$.

Магнитный потокъ $\Phi_x = B_x \cdot dx \cdot l$ сѣяленъ съ $2 \cdot \nu \cdot x$ стержнями статора или ротора и индуцируетъ въ ихъ обмоткахъ электродв. силу

$$d E_{nc} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot 2 \cdot \nu \cdot x \cdot B_x \cdot l \cdot dx \cdot 10^{-8}$$

Принимая во вниманіе противоположную сторону катушки и обозначая черезъ $w_{уд}$ —удѣльное число витковъ, имѣемъ

$$E_{nc} = \int_0^{\frac{\tau}{2}} 4,44 \cdot \omega_1 \cdot 4 \cdot w_{уд} \cdot x \cdot B_x \cdot l \cdot dx \cdot 10^{-8}$$

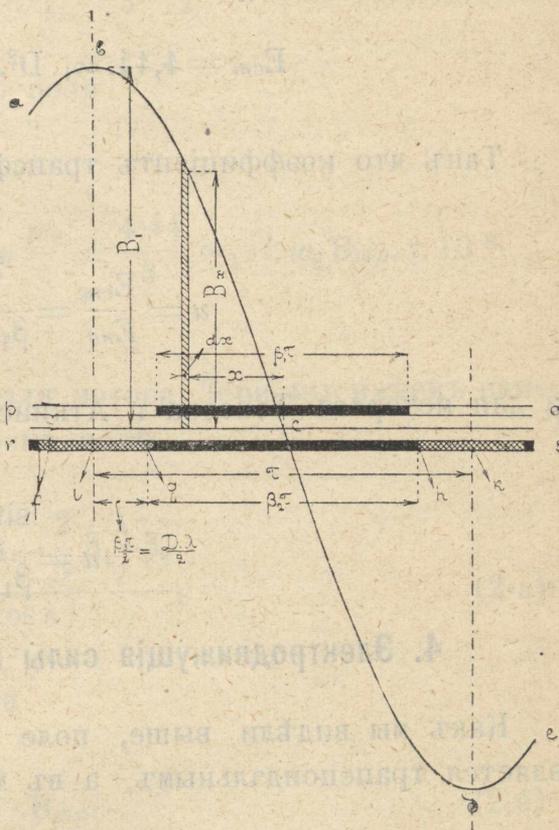


Рис. 8.

Примѣнимъ этотъ интегралль къ опредѣленію электродв. силы въ продольной катушкѣ мотора Дери. Здѣсь $x = \frac{D}{2} \alpha$ и $B_x = B_{nd} \sin \alpha$, гдѣ $\frac{D}{2}$ —радіусъ якоря, а α уголъ между поперечной осью мотора и разсматриваемой точкой. Поэтому

$$E_{nd} = 10^{-8} 4,44 \omega_1 4 \frac{D^2}{4} B_1 l \left\{ \frac{w_2}{\tau} \int_0^{\frac{\pi}{2} - \lambda} \alpha \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha + \frac{w_2}{\tau} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \lambda \right) \cdot \int_{\frac{\pi}{2} - \lambda}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha \cdot d\alpha + \right.$$

$$\left. + \frac{w_2}{2\tau} \int_{\frac{\pi}{2} - \lambda}^{\frac{\pi}{2}} \left(\alpha - \frac{\pi}{2} + \lambda \right) \sin \alpha \cdot d\alpha \right\} = 4,44 \cdot \omega_1 B_1 D^2 l \frac{w_2}{2\tau} (1 + \cos \lambda) 10^{-8}$$

гдѣ λ уголъ сдвига щетокъ отъ продольной оси.

Для моторовъ Томсона и Аткинсона третій интегралъ равенъ нулю и электродв. сила пульсаціи продольного поля

$$E_{nd} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot D^2 l \frac{w_2}{\tau} B_1 \cos \lambda \cdot 10^{-8}.$$

Подобнымъ же образомъ электродв. сила пульсаціи продольного поля въ обмоткѣ статора для всѣхъ моторовъ,

$$E_{cm} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot D^2 l \cdot \frac{w_1}{\beta_1 \tau} B_1 \sin \frac{\beta_1 \pi}{2} \cdot 10^{-8}.$$

Такъ что коэффициентъ трансформаціи для мотора Дери

$$u = \frac{E_{cm}}{E_{nd}} = \frac{2 \sin \frac{\beta_1 \pi}{2}}{\beta_1 (1 + \cos \lambda)} \cdot \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.а)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$u = \frac{\sin \frac{\beta_1 \pi}{2}}{\beta_1 \cos \lambda} \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.б)$$

4. Электродвижуція силы и реакціи катушекъ мотора

Какъ мы видѣли выше, поле ротора въ моторѣ Дери представляется трапециoidalнымъ, а въ моторахъ Томсона и Аткинсона тре-

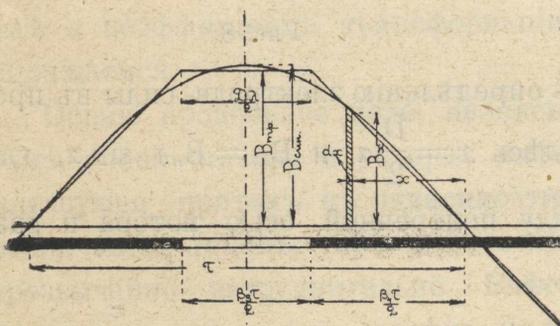


Рис. 9.

угольнымъ. Какъ въ томъ такъ и въ другомъ случаѣ мы замѣнимъ его (рис. 9) синусoidalнымъ, которое разложимъ на два составляющихъ: по направлению продольной оси мотора, дающее вмѣстѣ съ полемъ статора общее поле мотора, и 2) по направлению поперечной — поперечное поле. Эту замѣну

мы произведемъ съ такимъ расчетомъ, чтобы электродв. сила, индуцируемая синусoidalнымъ полемъ въ обмоткѣ ротора, была равна электродв. силѣ отъ трапециoidalнаго или треугольнаго.

Электродвиж. сила отъ трапецидальнаго поля (см. рис. 9) опредѣляется:

$$E_{mp} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot 4 \cdot 10^8 \left\{ \int_0^{\frac{\beta_4 \tau}{2}} \frac{B_{mp}}{\frac{\beta_4 \tau}{2}} x \cdot dx \cdot \frac{w_2}{\tau} \cdot x + \int_{\frac{\beta_4 \tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \frac{w_2}{\tau} \cdot \frac{\beta_4 \tau}{2} B_{mp} dx \right\} =$$

$$= 4,44 \omega_1 l \cdot w_2 B_{mp} \cdot \tau \beta_4 \left(1 - \frac{2}{3} \beta_4 \right) \cdot 10^8.$$

Электродв. сила отъ треугольнаго поля

$$E_{mp} = 4,44 \omega_1 l \cdot 4 \cdot 10^8 \cdot \int_0^{\frac{\tau}{2}} \frac{B_{mp}}{\frac{\tau}{2}} x^2 \cdot dx \cdot \frac{w_2}{\tau} = \frac{4,44}{3} \cdot \omega_1 \cdot l \cdot w_2 B_{mp} \cdot \tau \cdot 10^8.$$

Поэтому изъ условій $E_{sin} = E_{mp}$ для мотора Дери мы имѣемъ наибольшую индукцію при синусоидальномъ полѣ

$$B_{sin} = \frac{\pi^2 \cdot B_{mp} \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \beta_4 \right) \beta_4}{4 \cdot \cos \lambda}, \quad (2-a)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$B_{sin.} = \frac{\pi^2}{12} \cdot B_{mp}. \quad (2-b)$$

Электродвижущая сила вращенія поперечной катушки въ продольномъ полѣ для мотора Дери получается (рис. 8)

$$E''_{sp} = \int_{\frac{\beta_2 \tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x v \cdot dl = 2 \pi \cdot D \cdot \frac{n}{60} \cdot 2l \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\frac{\pi}{2} - \lambda}^{\frac{\pi}{2}} \frac{w_2}{2\tau} \cdot \frac{D}{2} \cdot d\alpha \cdot B_{nd} \sin \alpha =$$

$$= \sqrt{2} \cdot \omega_2 \cdot l \cdot w_2 \cdot D \cdot B_{nd} \cdot 10^{-8} \cdot \sin \lambda,$$

а въ моторахъ Томсона и Аткинсона

$$E''_{ep} = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{n}{60} \cdot 2l \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\frac{\pi}{2}-\lambda}^{\frac{\pi}{2}} \frac{w_2}{\tau} \cdot \frac{D}{2} \cdot d\alpha \cdot B_{nd} \sin \alpha =$$

$$= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_2 \cdot l \cdot w_2 \cdot D \cdot B_{nd} \cdot 10^{-8} \sin \lambda.$$

Отношение этихъ электродвижущихъ силъ вращения при синхронной скорости къ соответствующимъ электродв. силамъ пульсации мы обозначимъ черезъ c_1 .

Для мотора Дери оно равно

$$c_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot \omega_1 \cdot l \cdot w_2 \cdot D \cdot B_{nd} \cdot 10^{-8} \sin \lambda}{4,44 \cdot \omega_1 \cdot B_{nd} \cdot D^2 \cdot l \cdot \frac{w_2}{2\tau} \cdot (1 + \cos \lambda) \cdot 10^{-8}} = \frac{\sin \lambda}{1 + \cos \lambda} = \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}, \quad (3-a)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$c_1 = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \operatorname{tg} \lambda. \quad (3-b)$$

Электродвижущая сила вращения продольной катушки въ поперечномъ полѣ (рис. 10) для мотора Дери

$$E'_{ep} = 2 \pi D \frac{n}{60} \cdot 2l \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}-\lambda} \frac{w_2}{\tau} \cdot \frac{D}{2} d\alpha \cdot B_{np} \cos \alpha + \int_{\frac{\pi}{2}-\lambda}^{\frac{\pi}{2}} \frac{w_2}{2\tau} \cdot \frac{D}{2} d\alpha \cdot B_{np} \cos \alpha \right\}$$

$$= \sqrt{2} \cdot \omega_2 \cdot l \cdot w_2 \cdot D \cdot B_{np} \cdot 10^{-8} (1 + \cos \lambda),$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$E'_{ep} = 2 \sqrt{2} \cdot \omega_2 \cdot l \cdot w_2 \cdot D \cdot B_{np} \cdot 10^{-8} \cos \lambda.$$

Электродвижущая сила пульсации поперечнаго поля въ поперечной катушкѣ для мотора Дери

$$E''_{nc} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot D^2 \cdot B_{np} \cdot l \cdot 10^{-8} \frac{w_2}{2\tau} \left(\int_{\frac{\pi}{2}-\lambda}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cos \alpha d\alpha + \lambda \int_{\frac{\pi}{2}-\lambda}^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha d\alpha \right) =$$

$$= 4,44 \cdot \omega_1 \cdot B_{np} \cdot D^2 \cdot l \cdot \frac{w_2}{2\tau} \cdot \sin \lambda \cdot 10^{-8},$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$E''_{nc} = 4,44 \cdot \omega_1 \cdot B_{np} D^2 \cdot l \frac{w_2}{\tau} \sin \lambda \cdot 10^{-8}.$$

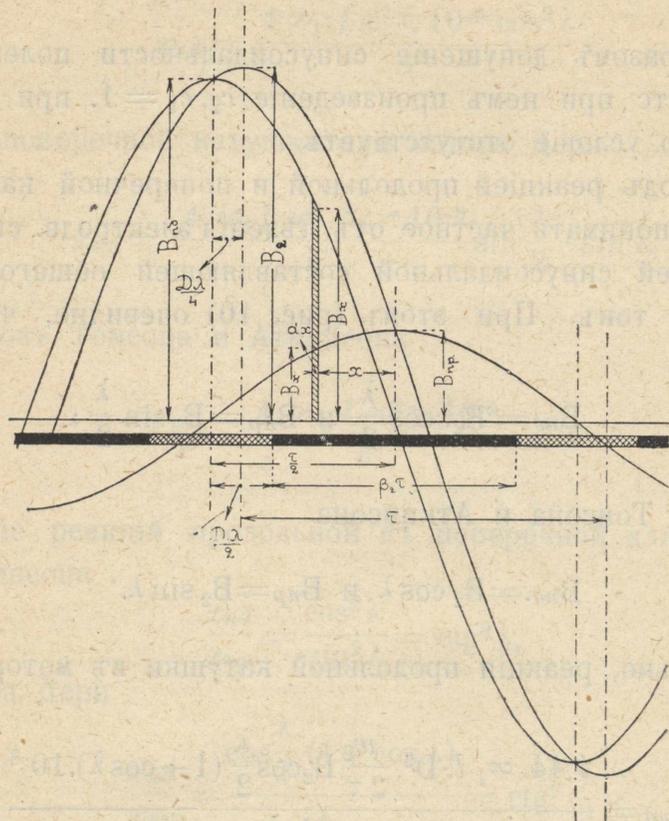


Рис. 10.

Отношение этихъ электродвижущихъ силъ вращения при синхронной скорости къ соответствующимъ электродв. силамъ пульсаціи мы обозначимъ черезъ c_2 . Для мотора Дери

$$c_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot \omega_1 \cdot w_2 \cdot B_{np} \cdot 10^{-8}}{4,44 \cdot \omega_1 \cdot D^2 l \frac{w_2}{2\tau} B_{np} 10^{-8}} \cdot \frac{1 + \cos \lambda}{\sin \lambda} = \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2}, \quad (4-a)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$c_2 = \frac{\cos \lambda}{\sin \lambda} = \operatorname{ctg} \lambda. \quad (4-b)$$

Отношение $\frac{c_2}{c_1}$ для мотора Дери

$$\frac{c_2}{c_1} = \operatorname{ctg}^2 \frac{\lambda}{2}, \quad (5-a)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$\frac{c_2}{c_1} = \operatorname{ctg}^2 \lambda. \quad (5-b)$$

Такимъ образомъ допущеніе синусоидальности полей характеризуется тѣмъ, что при немъ произведение $c_2 \cdot c_1 = 1$, при другихъ формахъ полей это условіе отсутствуетъ.

Реакции. Подъ реакціей продольной и поперечной катушекъ ротора мы будемъ понимать частное отъ дѣленія электродв. силы пульсаціи соответствующей синусоидальной составляющей общаго поля ротора на вторичный токъ. При этомъ (рис. 10) очевидно, что въ моторѣ Дери

$$B_{nd} = B_2 \cdot \cos \frac{\lambda}{2} \text{ и } B_{np} = B_2 \sin \frac{\lambda}{2}, \quad (6-a)$$

а въ моторахъ Томсона и Аткинсона

$$B_{nd} = B_2 \cos \lambda \text{ и } B_{np} = B_2 \sin \lambda. \quad (6-b)$$

Слѣдовательно, реакція продольной катушки въ моторѣ Дери

$$x_{nd} = \frac{4,44 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot D^2 \cdot \frac{w_2}{2\tau} B_2 \cos \frac{\lambda}{2} (1 + \cos \lambda) \cdot 10^{-8}}{J_2};$$

подставляя вмѣсто B_2 его значеніе, равное

$$B_2 = 0,4 \pi \frac{w_2 \cdot \beta_4}{2 \delta''} J_2 \sqrt{2},$$

(гдѣ δ'' воздушный промежутокъ, замѣщающій магнитное сопротивленіе цѣпи силовой трубки, который мы будемъ считать одинаковымъ для всѣхъ трубокъ) получаемъ

$$x_{nd} = \frac{4 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot \beta_4 \cdot w_2^2 \cdot \tau \cdot 10^{-9} \cdot \cos \frac{\lambda}{2} (1 + \sin \lambda)}{\delta''}, \quad (7-a)$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$x_{nd} = \frac{4,44 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot D^2 \cdot \frac{w_2}{\tau} B_2 \cos^2 \lambda \cdot 10^{-8}}{J_2}.$$

или подставляя значеніе

$$B_2 = 0,4 \cdot \pi \cdot \frac{w_2}{2 \delta''} \cdot J_2 \sqrt{2},$$

имѣемъ

$$x_{nd} = \frac{4 \omega_1 \cdot l \cdot w_2^2 \tau \cdot 10^{-9} \cos^2 \lambda}{\delta''}. \quad (7 \text{ b})$$

Реакція поперечной катушки для мотора Дери

$$x_{np} = \frac{4 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot w_2^2 \beta_4 \cdot \tau \cdot 10^{-9}}{\delta''} \sin \frac{\lambda}{2} \cdot \sin \lambda, \quad (8 \text{ a})$$

а для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$x_{np} = \frac{4 \cdot \omega_1 \cdot l \cdot w_2^2 \tau \cdot 10^{-9}}{\delta''} \sin^2 \lambda. \quad (8 \text{ b})$$

Отношеніе реакцій продольной къ поперечной для моторовъ Томсона и Аткинсона

$$\frac{x_{nd}}{x_{np}} = \frac{\cos^2 \lambda}{\sin^2 \lambda} = \text{ctg}^2 \lambda,$$

а для мотора Дери

$$\frac{x_{nd}}{x_{np}} = \frac{\cos \frac{\lambda}{2} (1 + \cos \lambda)}{\sin \frac{\lambda}{2} \sin \lambda} = \text{ctg}^2 \frac{\lambda}{2}.$$

Такимъ образомъ для всѣхъ трехъ моторовъ

$$\frac{x_{nd}}{x_{np}} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (9)$$

Можно показать, что подобное соотношеніе между реакціями x_{nd} и x_{np} . существуетъ и при нѣкоторыхъ другихъ формахъ полей, поэтому въ дальнѣйшемъ $\frac{C_2}{C_1}$ ради общности не соединено въ одну постоянную.

5. Дѣйствующее сопротивленіе, дѣйствующая реакція цѣпи ротора и функциональная связь между ними.

Изъ треугольника $O b k$ (рис. 7) мы получаемъ вторичный токъ

$$J_2 = \frac{\sqrt{E_2^2 + (E_2 c_1 v)^2}}{\sqrt{(x_{np} \cos \gamma v c_2 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma)^2 + (x_{np} \cos \gamma + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma)^2}}$$

или вводя обозначеніе черезъ F

$$\sqrt{(x_{np} \cos \gamma v c_2 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma)^2 + (x_{np} \cos \gamma + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma)^2} = F,$$

$$J_2 = \frac{\sqrt{E_2^2 + (E_2 c_1 v)^2}}{F}.$$

Въ дальнѣйшемъ для краткости $x_{np} \cos \gamma$ мы будемъ обозначать черезъ x_3 , тогда дѣйствующій коэффициентъ мощности цѣпи ротора

$$\cos \psi_{2v} = \cos (\beta - \alpha - \gamma) =$$

$$= \frac{(x_3 v c_2 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma) (b_{np} - c v g_{np}) + (x_3 + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) (c_1 v b_{np} + g_{np})}{F \cdot \sqrt{1 + (c_1 v)^2} \cdot \sqrt{g_{np}^2 + b_{np}^2}},$$

гдѣ $\angle \alpha = \angle aOb$, $\angle \beta = \angle kOb$ (см. рис. 7).

Такимъ образомъ дѣйствующее сопротивление

$$R_v = \frac{E_2 \cos \varphi_2}{J_2} =$$

$$= \frac{(c_2 v x_3 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma) (b_{np} - c_1 v g_{np}) + (x_3 + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) (c_1 v b_{np} + g_{np})}{(1 + (c_1 v)^2) \sqrt{g_{np}^2 + b_{np}^2}},$$

или послѣ раскрытія скобокъ и приведенія подобныхъ членовъ

$$R_v = \frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \{ r_2 + x_2 c_1 v + v \cos \gamma (c_1 + c_2) x_3 + \sin \gamma x_3 - v^2 c_1 c_2 \sin \gamma x_3 \}. \quad (10)$$

Подобнымъ же образомъ

$$\sin \psi_{2v} =$$

$$= \frac{(x_3 + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) (b_{np} - c_1 v g_{np}) - (c_2 v x_3 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma) (c_1 v b_{np} + g_{np})}{F \cdot \sqrt{1 + (c_1 v)^2} \cdot \sqrt{b_{np}^2 + g_{np}^2}}$$

и дѣйствующая реакція

$$X_v = \frac{E_2 \sin \varphi_2}{J_2} =$$

$$= \frac{(x_3 + x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) (b_{np} - c_1 v g_{np}) - (c_2 v x_3 + r_2 \cos \gamma - x_2 \sin \gamma) (c_1 v b_{np} + g_{np})}{[1 + (c_1 v)^2] \cdot \sqrt{b_{np}^2 + g_{np}^2}},$$

а послѣ преобразованій

$$X_v = \frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \{ x_2 - c_1 v r_2 - x_3 \sin \gamma v (c_1 + c_2) + x_3 \cos \gamma - x_3 \cos \gamma c_1 c_2 v^2 \}. \quad (11)$$

Дѣйствующее кажущееся сопротивление

$$Z_v = \sqrt{R_v^2 + X_v^2} = \sqrt{\frac{1}{[1+(c_1 v)^2]^2} \{ (r_2^2 + x_2^2) [1 + (c_1 v)^2] + x_3^2 + \\ + v^2 (c_1 + c_2)^2 x_3^2 + (v^2 c_1 c_2 x_3)^2 + 2 r_2 x_3 v \cos \gamma c_2 - 2 x_2 x_3 v \sin \gamma c_2 + \\ + 2 v^2 r_2 x_3 \sin \gamma c_1^2 + 2 v^2 x_2 x_3 \cos \gamma c_1^2 - 2 v^3 x_2 x_3 \sin \gamma c_1^2 c_2 - 2 v^3 r_2 x_3 \cos \gamma c_1^2 c_2 + \\ + 2 r_2 x_3 \sin \gamma + 2 x_2 x_3 \cos \gamma - 2 v^2 x_3^2 c_1 c_2 \}}$$

по приведеніи подобныхъ членовъ и сокращеній на $1 + c_1^2 v^2$

$$Z_v = \sqrt{\frac{1}{1 + c_1^2 v^2} \{ r_2^2 + x_2^2 + x_3^2 (1 + c_2^2 v^2) + 2 x_3 [r_2 (\sin \gamma + c_2 v \cos \gamma) + \\ + x_2 (\cos \gamma - c_2 v \sin \gamma)] \}} \quad (12)$$

При $v = 0$

$$R_{v=0} = r_2 + x_3 \sin \gamma, \quad X_{v=0} = x_2 + x_3 \cos \gamma \quad \text{и}$$

$$Z_{v=0} = \sqrt{r_2^2 + x_2^2 + x_3^2 + 2 x_3 (r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma)}$$

при $v = \infty$

$$R_{v=\infty} = -\frac{c_1}{c_2} x_3 \sin \gamma, \quad X_{v=\infty} = -\frac{c_2}{c_1} x_3 \cos \gamma \quad \text{и} \quad Z_{v=\infty} = -\frac{c_2}{c_1} x_3.$$

Для полученія функциональной связи между R_v и X_v , мы должны изъ обоихъ уравненій (10) и (11) исключить v , для чего представимъ ихъ въ слѣдующемъ видѣ

$$(R_v c_1^2 + c_1 c_2 \sin \gamma x_3) v^2 - [c_1 x_2 + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3] v - (r_2 + \sin \gamma x_3 - R_v) = 0$$

$$\text{и} \quad (X_v c_1^2 + c_1 c_2 \cos \gamma x_3) v^2 + [c_1 r_2 + (c_1 + c_2) \sin \gamma x_3] v - (x_2 + \cos \gamma x_3 - X_v) = 0.$$

Обозначая $R_v c_1^2 + c_1 c_2 \sin \gamma x_3 = A_1$, $c_1 x_2 + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3 = B_1$, $r_2 + \sin \gamma x_3 - R_v = C_1$, $X_v c_1^2 + c_1 c_2 \cos \gamma x_3 = A_2$, $c_1 r_2 + (c_1 + c_2) \sin \gamma x_3 = B_2$, $x_2 + \cos \gamma x_3 - X_v = C_2$ и исключая изъ получившихся такимъ образомъ уравненій v^2 и v , имѣемъ

$$v^2 = \frac{C_1 B_2 + B_1 C_2}{A_1 B_2 + A_2 B_1}, \quad v = \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{A_1 B_2 + A_2 B_1}.$$

Приравниваемъ

$$(A_1 C_2 - C_1 A_2)^2 = (A_1 B_2 + A_2 B_1) (C_1 B_2 + B_1 C_2); \quad (13)$$

откуда, подставляя значенія A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 ,

$$A_1 C_2 - C_1 A_2 = c_1^2 x_2 R_v + c_1 c_2 x_3^2 \sin \gamma \cos \gamma + R_v c_1^2 x_3 \cos \gamma - c_1^2 X_v R_v +$$

$$\begin{aligned}
& +c_1 c_2 x_3 x_2 \sin \gamma - c_1 c_2 \sin \gamma x_3 X_v - r_2 c_1^2 X_v - c_1^2 x_3 X_v \sin \gamma + c_1^2 X_v R_v - \\
& - c_1 c_2 x_3^2 \sin \gamma \cos \gamma - r_2 c_1 c_2 x_3 \cos \gamma + c_1 c_2 \cos \gamma x_3 R_v = (c_1^2 x_2 + c_1^2 x_3 \cos \gamma + \\
& + c_1 c_2 \cos \gamma x_3) R_v - (c_1^2 r_2 + c_1^2 x_3 \sin \gamma + c_1 c_2 \sin \gamma x_3) X_v + c_1 c_2 x_3 (x_2 \sin \gamma - \\
& - r_2 \cos \gamma);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_1 B_2 + A_2 B_1 &= c_1^2 [c_1 r_2 + (c_1 + c_2) \sin \gamma x_3] R_v + c_1^2 [c_1 x_2 + \\
& + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3] X_v + c_1^2 c_2 x_3 (\sin \gamma r_2 + \cos \gamma x_2) + c_1 c_2 (c_1 + c_2) x_3^2; \\
C_1 B_2 + C_1 B_2 &= c_1 (x_2^2 + r_2^2) + c_1 x_3 (x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) + (c_1 + c_2) x_3^2 + \\
& + (c_1 + c_2) x_3 (x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) - [c_1 x_2 + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3] X_v - \\
& - (c_1 r_2 + (c_1 + c_2) \sin \gamma x_3) R_v.
\end{aligned}$$

Обозначая

$$\begin{aligned}
c_1 x_2 + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3 &= D; & c_1 r_2 + (c_1 + c_2) \sin \gamma x_3 &= E; \\
x_3 (x_2 \sin \gamma - r_2 \cos \gamma) &= H; & x_3 (x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) &= K; & (c_2 + c_1) x_3^2 &= L; \\
c_1 (x_2^2 + r_2^2) &= M;
\end{aligned}$$

и вставляя эти обозначенія въ ур. 5, получаемъ послѣ нѣкоторыхъ преобразованій уравненіе окружности:

$$\begin{aligned}
R_v^2 (D^2 + E^2) + X_v (D^2 + E^2) + R_v [2 c_2 D \cdot H + c_2 K E + \frac{c_2}{c_1} \cdot L \cdot E - \\
- 2 (c_1 + c_2) \cdot K \cdot E - M E - L E] + X_v [c_2 K \cdot D + \frac{c_2}{c_1} L \cdot D - 2 c_2 H E - \\
- (2 c_1 + c_2) K \cdot D - M \cdot D - L \cdot D] + [c_2^2 H^2 - c_2 (2 c_1 + c_2) K^2 - c_2 K \cdot M - \\
- c_2 L K - \frac{c_2}{c_1} (2 c_1 + c_2) \cdot K \cdot L - \frac{c_2}{c_1} \cdot L \cdot M - \frac{c_2}{c_1} L^2].
\end{aligned}$$

Подставляя значенія D , E , H , K , L и M и дѣлая преобразованія, имѣемъ:

$$\begin{aligned}
D^2 + E^2 &= c_1^2 (r_2^2 + x_2^2) + (c_1 + c_2)^2 x_3^2 + 2 c_1 (c_1 + c_2) x_3 (r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma) \\
2 c_2 D H - 2 c_1 K \cdot E - M E - L E \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) &= [-r_2 - \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) x_3 \sin \gamma] \cdot \\
&\cdot \{c_1^2 (r_2^2 + x_2^2) + (c_1 + c_2)^2 x_3^2 + 2 c_1 (c_1 + c_2) x_3 (r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma)\}; \\
- \left[2 \cdot c_2 \cdot H \cdot E + c_1 \cdot K \cdot D + M D + L D \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)\right] &= \left[-x_2 - x_3 \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)\right] \cdot \\
&\cdot \left(c_1^2 (r_2^2 + x_2^2) + (c_1 + c_2)^2 x_3^2 + 2 c_1 (c_1 + c_2) x_3 (r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma)\right);
\end{aligned}$$

$$c_2^2 H_2^2 - c_2(2c_1 + c_2) K^2 - c_2 K M - \frac{c_2}{c_1}(3c_1 + c_2) K.L - \frac{c_2}{c_1} L M - \frac{c_2}{c_1} L^2 =$$

$$= -\frac{c_2}{c_1}(x_3^2 + x_3 x_2 \cos \gamma + x_3 r_2 \sin \gamma)[c_1^2(r_2^2 + x_2^2) + (c_1 + c_2)^2 x_3^2 +$$

$$+ 2c_1(c_1 + c_2)x_3(r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma)].$$

Сокращая на $c_1^2(r_2^2 + x_2^2) + (c_1 + c_2)^2 x_3^2 + 2c_1(c_1 + c_2)x_3(r_2 \sin \gamma + x_2 \cos \gamma)$, получаемъ уравнение круга въ видѣ

$$X_v^2 + R_v^2 - X_v \left[x_2 + x_3 \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) \right] - R_v \left[r_2 + x_3 \sin \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) \right] - \frac{c_2}{c_1} (x_3^2 +$$

$$+ x_3 x_2 \cos \gamma + x_3 r_2 \sin \gamma) = 0,$$

которое послѣ небольшихъ преобразований можно представить въ такомъ видѣ:

$$\left\{ X_v - \frac{1}{2} \left[x_2 + x_3 \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\}^2 + \left\{ R_v - \frac{1}{2} \left[r_2 + x_3 \sin \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\}^2 =$$

$$= \frac{1}{4} \left\{ r_2^2 + x_2^2 + x_3^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right)^2 + 2x_3 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) (x_2 \cos \gamma + r_2 \sin \gamma) \right\}. \quad (14)$$

6. Построение круговой диаграммы путемъ послѣдовательныхъ обращений.

Приведемъ x_2 , r_2 и x_3 къ первичной цѣпи, помноживъ ихъ на квадратъ коэффициента трансформации, и обозначимъ приведенныя значенія ихъ значкомъ'

$$x_2' = u^2 x_2, \quad r_2' = u^2 r_2, \quad x_3' = u^2 x_3,$$

тогда

$$R_2' v = \frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \{ r_2' + x_2' c_1 v +$$

$$+ x_3' [v \cos \gamma (c_1 + c_2) + \sin \gamma - v^2 \sin \gamma c_1 c_2] \}$$

$$X_2' v = \frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \{ x_2' - r_2' c_1 v + x_3' [\cos \gamma -$$

$$- v \sin \gamma (c_1 + c_2) - \cos \gamma c_1 c_2 v^2] \}$$

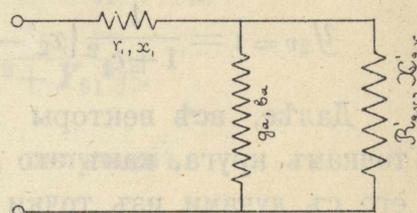


Рис. 11.

и приведенная схема получаетъ видъ рис. 11.

Изъ уравненія 6, подставляя туда r_2' , x_2' и x_3' и принявъ масштабъ m омовъ въ 1 см, получаемъ радіусъ ρ''' и координаты центра η_0''' , ξ_0''' круга K_p''' :

$$\rho''' = \frac{1}{2m} \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}; \quad (15)$$

$$\eta_0''' = \frac{1}{2m} \left[x_2' + x_3' \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \right]; \quad \xi_0''' = \frac{1}{2m} \left[r_2' + x_3' \sin \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \right]. \quad (16)$$

Построенный по этимъ даннымъ, съ началомъ координатъ въ точкѣ O , кругъ $K\rho'''$ (рис. 12*, табл. I) представляетъ геометрическое мѣсто кажущихся сопротивленій при измѣненіи v .

Нанесемъ на этомъ кругѣ слѣдующія точки: 1) точку A'' , при которой $v = \infty$, съ координатами

$$x_{2v=\infty} = -\frac{c_2}{c_1} \sin \gamma \quad \text{и} \quad y_{2v=\infty} = -\frac{c_2}{c_1} \cos \gamma;$$

она получается, слѣдовательно, просто проведеніемъ линіи подъ угломъ γ къ оси ординатъ въ третьей четверти.

2) Точку K''' , при которой $v=0$ съ координатами

$$x_{2v=0} = r_2' + x_3' \sin \gamma \quad \text{и} \quad y_{2v=0} = x_2' + x_3' \cos \gamma,$$

для полученія которой достаточно черезъ точку A'' провести діаметръ, K''' лежитъ на другомъ его концѣ. Это видно изъ слѣдующаго: абсцисса точки противолежащей A'' будетъ

$$\frac{c_2}{c_1} x_3' \sin \gamma + 2 \xi_0''' = r_2' + x_3' \sin \gamma, \quad \text{а ордината} \quad \frac{c_2}{c_1} x_3' \cos \gamma + 2 \eta_0''' = x_2' + x_3' \cos \gamma,$$

что представляетъ, какъ мы видѣли, координаты точки K''' .

3) Третьей точкой является точка C''' , при которой $v=1$, съ координатами

$$x_{2v=1} = \frac{1}{1+c_1^2} \{ r_2' + c_1 x_2' + (c_1+c_2) \cos \gamma x_3' + \sin \gamma x_3' - c_1 c_2 \sin \gamma x_3' \},$$

$$y_{2v=1} = \frac{1}{1+c_1^2} \{ x_2' - c_1 r_2' - (c_1+c_2) \sin \gamma x_3' + \cos \gamma x_3' - c_1 c_2 \cos \gamma x_3' \}.$$

Далѣе, всѣ векторы OT''' при $v=2, 3, -1, -2$ и т. д. идутъ къ точкамъ круга, какъ это нетрудно доказать, лежащимъ на пересѣченіи его съ лучами изъ точки A'' къ отрѣзкамъ линіи перпендикулярной $A''O$, равнымъ отрѣзку этой линіи между лучами $A''K'''$ и $A''C'''$.

При измѣненіи v отъ 0 до ∞ конецъ вектора OT''' движется по верхней половинѣ круга отъ K''' черезъ C''' до A'' , а при измѣненіи v отъ 0 до $-\infty$ движется по нижней.

*) На рис. 12 и послѣдующихъ положительная ось абсцисъ направлена вверхъ, а положительная ось ординатъ влѣво, отъ начала координатъ.

Обращая кругъ K_p''' относительно точки O , получаемъ кругъ K_p'' , представляющий изъ себя геометрическое мѣсто кажущихся проводимостей

$$Y_{2v} = \frac{1}{Z_{2v}};$$

при этомъ точкамъ K''', C''', A''' круга K_p''' соответствуетъ точки K'', C'', A'' круга K_p'' .

Найдемъ зависимость между радиусомъ и координатами центра круговъ основного K_p''' и обращеннаго K_p'' . Пусть (рис. 13) K_p , представляетъ основной кругъ, построенный въ масштабѣ $m \Omega$ въ 1 см., а K_{p_2} —обращенный, въ масштабѣ $n \Omega$ въ 1 см. Проведемъ черезъ центры C_1 и C_2 и начало координатъ O прямую $a_1 a_2$. Изъ подобія обращенныхъ фигуръ имѣемъ

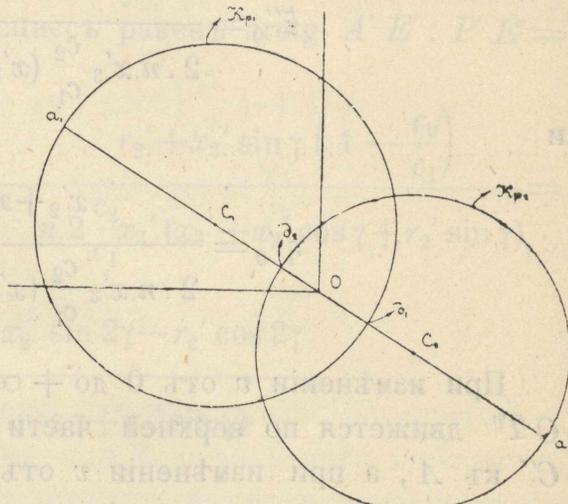


Рис. 13.

$$\frac{O\delta_1}{O\delta_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{X_{01}}{X_{02}} = \frac{Y_{01}}{Y_{02}},$$

гдѣ R_1 и R_2 —радиусы, а X_{01} , X_{02} , Y_{01} и Y_{02} координаты центра основного и обращеннаго круговъ.

Изъ послѣдняго уравненія

$$\frac{O\delta_1}{Oa_1} \cdot \frac{Oa_1}{O\delta_2} = \frac{R_1}{R_2}; \tag{17}$$

но

$$Oa_1 = R_1 + \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2}, \quad O\delta_1 = R_1 - \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2},$$

$$\frac{Oa_1}{O\delta_2} = m \cdot n (Oa_1)^2 = m \cdot n (R_1 + \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2})^2.$$

Подставляя эти значенія въ уравненіи 17, получаемъ

$$R_2 = \frac{R_1}{m \cdot n (R_1 + \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2})^2} \cdot \frac{R_1 + \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2}}{R_1 - \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2}} = \frac{R_1}{m \cdot n} \cdot \frac{1}{R_1^2 - X_{01}^2 - Y_{01}^2}.$$

Подобнымъ же образомъ

$$X_{02} = \frac{X_{01}}{m \cdot n} \cdot \frac{1}{R_1^2 - X_{01}^2 - Y_{01}^2} \quad \text{и} \quad Y_{02} = \frac{Y_{01}}{m \cdot n} \cdot \frac{1}{R_1^2 - X_{01}^2 - Y_{01}^2}.$$

Примѣняя эти формулы къ нашему обращенному кругу K_p'' (рис. 12), получаемъ радиусъ его

$$\rho'' = \frac{\sqrt{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}}{2 \cdot n \cdot x_3' \frac{c_2}{c_1} (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

и координаты центра

$$\xi''_0 = \frac{r_2' + x_3' \sin \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}{2 \cdot n \cdot x_3' \frac{c_2}{c_1} (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

и

$$\eta''_0 = \frac{x_2' + x_3' \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}{2 \cdot n \cdot x_3' \frac{c_2}{c_1} (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

При измѣненіи v отъ 0 до $+\infty$ векторъ кажущейся проводимости OT'' движется по верхней части окружности отъ точки K'' черезъ C'' къ A' , а при измѣненіи v отъ 0 до $-\infty$ по нижней. Такъ какъ, при постоянномъ напряженіи ротора E'_{nc} , токъ его пропорционаленъ вектору кажущейся проводимости

$$J_2' = E'_{nc1} \cdot Y_{2v},$$

и такъ какъ E'_{nc1} совпадаетъ съ осью абсциссъ, то абсциссы точекъ окружности представляютъ въ извѣстномъ масштабѣ мощность, получаемую роторомъ, и ось ординатъ отсѣкаетъ на окружности двѣ точки g'' и h'' , гдѣ эта мощность равна нулю.

Для полученія результирующей кажущейся проводимости вѣтвей bc и ef (рис. 11) мы должны прибавить кажущуюся проводимость $y_a = g_a + j b_a$ вѣтви возбужденія. Нетрудно видѣть, что векторъ

$$A'O = \frac{1}{\frac{c_2}{c_1} x_3'} = \frac{c_1 b_{nd}}{c_2 \cos \gamma} = \frac{b_a}{\cos \gamma},$$

такъ что конецъ вектора y_a приходится какъ разъ въ точкѣ окружности A' . Такимъ образомъ результирующая проводимость вѣтвей bc и ef $Y_v' = Y_{2v}' + y_a$ представляется векторомъ $A'T' = OA' + OT'$, и начало координатъ переходитъ въ точку A' .

Обращая кругъ K_p'' относительно точки A' , получаемъ прямую линию K_p' , перпендикулярную къ $A'P'$ и проходящую на разстояніи DA' . Если масштабъ $DA' p \Omega$ въ 1 см., то

$$DA' = \frac{1}{2pnR''} = \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}{p \cdot \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}} \quad (18)$$

Уголъ наклона $A'P'$ къ оси абсциссъ равенъ $\arctg A'E' : P'E' = \arctg \xi_0' : \eta_0'$,

$$\text{но } \xi_0' = OA' \sin \gamma - \xi_0'' = \frac{\sin \gamma}{n \frac{c_2}{c_1} x_3'} - \frac{r_2' + x_3' \sin \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}{n \cdot 2 \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)} =$$

$$= \frac{x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma}{2n \cdot \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)},$$

подобнымъ же образомъ

$$\eta_0' = OA' \cos \gamma - \eta_0'' = \frac{\cos \gamma}{n \frac{c_2}{c_1} x_3'} - \frac{x_2' + x_3' \cos \gamma \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}{2n \cdot \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)} =$$

$$= \frac{x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma}{2n \cdot \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

И уголъ наклона $P'A'$ къ оси абсциссъ

$$\varepsilon = \arctg \frac{x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma}{x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma} \quad (19)$$

Такимъ образомъ уравненіе прямой K_p' будетъ

$$x \frac{x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) \sin \gamma + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma}{\rho'''} +$$

$$+ y \frac{x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \cos \gamma + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma}{\rho'''} = 0;$$

$$\frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}{p \cdot \rho'''} = 0;$$

$$(81) \quad x \frac{x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \sin \gamma + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma}{\frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)} +$$

$$+ y \frac{x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \cos \gamma + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma}{\frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)} - \frac{1}{p} = 0,$$

или

$$x \xi_0' + y \eta_0' = \frac{1}{2pn}. \quad (20)$$

Прямая K_p' представляет геометрическое мѣсто кажущихся сопротивленіи вѣтвей bc и ef при измѣненіи v . Векторъ $A'T'$, представляющій это кажущееся сопротивленіе, равенъ

$$A'T' = \frac{1}{Y_v'} = \frac{1}{Y_{2v} + y_a} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{2v}} + y_a}.$$

Точкамъ $K'' C'' A'$ круга K_p'' соотвѣтствуютъ точки K', C' и ∞ прямой K_p' . При измѣненіи v отъ 0 до $+\infty$ векторъ $A'T'$ движется по верхней части прямой K_p' отъ точки K' черезъ C' въ $+$ бесконечность, при измѣненіи же v отъ 0 до $-\infty$ онъ движется по нижней части отъ K' до $-\infty$.

Нетрудно доказать, что векторъ $A'T'$ при $v = 0, 1, 2, 3$ и т. д., а также $0, -1, -2, -3$ и т. д. проходитъ черезъ точки, лежащія на этой прямой въ одинаковыхъ другъ отъ друга разстояніяхъ. Въ самомъ дѣлѣ, найдемъ абсциссу произвольной точки T' , лежащей на этой прямой. Соотвѣтствующія точки на кругахъ K_p''' и K_p'' будутъ T''' и T'' . Изъ треугольника $T'' O A'$ мы имѣемъ

$$(T'' A')^2 = (T'' O)^2 + (O A')^2 - 2 \cdot T'' O \cdot O A' \cdot \cos T'' O A', \quad (21)$$

но $\cos T'' O A' = \cos (180 - T'' O h'' + \gamma) = -\cos (\delta_v - \gamma)$,

гдѣ $\angle T''Oh''$ мы обозначимъ черезъ δ_v . Изъ круга K_p'''

$$\cos(\delta_v - \gamma) = \frac{X'_{2v} \cos \gamma + R'_{2v} \sin \gamma}{Z'_{2v}}$$

Подставляя въ ур. 21 значенія векторовъ $T''O = \frac{1}{Z'_{2v}}$, $OA' = \frac{1}{\frac{c_2}{c_1} x_3'}$

и значеніе $\cos(\delta_v - \gamma)$ получаемъ

$$(T''A')^2 = \frac{1}{Z'_{2v}{}^2} + \frac{1}{\left(\frac{c_2}{c_1} x_3'\right)^2} + 2 \frac{1}{Z'_{2v} \frac{c_2}{c_1} x_3'} \frac{X'_{2v} \cos \gamma + R'_{2v} \sin \gamma}{Z'_{2v}}$$

Абсцисса точки T' .

$$\begin{aligned} T'H_v &= \frac{1}{T''A'} \cdot \sin T'A'H' = \frac{1}{T''A'} \cdot \frac{T'H'' + \frac{1}{\frac{c_2}{c_1} x_3'} \sin \gamma}{T'A'} = \\ &= \frac{\frac{1}{Z'_{2v}} \sin \delta_v + \frac{1}{\frac{c_2}{c_1} x_3'} \sin \gamma}{(T''A')^2} = \frac{\frac{R'_{2v}}{Z'_{2v}{}^2} + \frac{1}{\frac{c_2}{c_1} x_3'} \sin \gamma}{\frac{1}{Z'_{2v}{}^2} + \frac{1}{\left(\frac{c_2}{c_1} x_3'\right)^2} + 2 \frac{X'_{2v} \cos \gamma + R'_{2v} \sin \gamma}{Z'_{2v} \cdot \frac{c_2}{c_1} x_3'}} = \\ &= \frac{\left(R'_{2v} \frac{c_2}{c_1} x_3' + Z'_{2v}{}^2 \sin \gamma\right) \frac{c_2}{c_1} x_3'}{c_2 x_3' + Z'_{2v}{}^2 + 2 \frac{c_2}{c_1} x_3' (X'_{2v} \cos \gamma + R'_{2v} \sin \gamma)} \end{aligned}$$

Подставляя значеніе R'_{2v} , X'_{2v} и Z'_{2v} и дѣлая приведеніе подобныхъ членовъ, получаемъ

$$\begin{aligned} T'H_v &= \frac{\left[\left\{ r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + 2x_3' (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma) \right\} \sin \gamma + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{c_2}{c_1} x_3' \cos \gamma + x_3' \cos \gamma + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right) c_2 v x_3' \right] \frac{c_2}{c_1} x_3'}{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)} \quad (22) \end{aligned}$$

—линейное уравненіе при переменномъ v .

При $v=0$

$$T'H'_{v=0} = \frac{\left[\left\{ r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + 2x_3' (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma) \right\} \sin \gamma + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' \right] \frac{c_2}{c_1} \cdot x_3'}{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

И разность абсциссъ точекъ T' и K'

$$T'H'_v - T'H'_{v=0} = \\ = \frac{\left[\left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) x_3' \cos \gamma + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] c_2 v x_3' \cdot \frac{c_2}{c_1} \cdot x_3'}{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)},$$

т. е. возвышеніе точекъ $T'_{v=1}$, $T'_{v=2}$ и т. д. надъ точкой $T'_{v=0}$ пропорціонально v . Разстояніе между точками $T'_{v=0}$ и $T'_{v=1}$ или же $T'_{v=1}$ и $T'_{v=2}$ и т. д. выражается:

$$K'C' = \frac{T'H'_{v=1} - T'H'_{v=0}}{\sin \varepsilon} = \\ = \frac{\left[\left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) x_3' \cos \gamma + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] c_2 v x_3' \cdot \frac{c_2}{c_1} \cdot x_3'}{\left[x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right)^2 +}} \\ + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

Прибавляя къ точкѣ $A' r_1 - jx_1$ получаемъ новое начало координатъ въ точкѣ A . Тогда векторъ AT' , представляющій кажущееся сопротивление всей нашей цѣпи, равенъ

$$AT' = Z_6 = z_1 + \frac{1}{Y'_{2v} + y_a}$$

Обращая относительно точки A , мы получаемъ кругъ, проходящій черезъ послѣднюю и представляющій геометрическое мѣсто кажущихся проводимостей, при измѣненіи v .

Диаметръ этого круга

$$2\rho = \frac{1}{q \cdot p \cdot (A'D' + x_1 \sin \varepsilon + r_1 \cos \varepsilon)} =$$

$$= \frac{\sqrt{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}}{q \cdot \left\{ \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma) + r_1 \left[x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma \right] + x_1 \left[x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] \right\}}.$$

Уголъ наклона радиуса изъ начала координатъ остается тѣмъ же самымъ, поэтому координаты центра будутъ:

$$\xi_0 = \rho \cos \varepsilon = + \frac{x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma}{2 \cdot q \left\{ \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma) + r_1 \left[x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma \right] + x_1 \left[x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] \right\}}.$$

$$\eta_0 = \rho \sin \varepsilon = + \frac{x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma}{2 \cdot q \left\{ \frac{c_2}{c_1} x_3' (x_3' + x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma) + r_1 \left[x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \sin 2\gamma - r_2' \cos 2\gamma \right] + x_1 \left[x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) + x_2' \cos 2\gamma + r_2' \sin 2\gamma \right] \right\}}.$$

Обыкновенно въ репульсионныхъ моторахъ, благодаря слабому насыщению желѣза, уголъ γ очень малъ, такъ что въ формулы радиуса и координатъ центра послѣдняго круга мы можемъ ввести упрощенія.

Въ общемъ знаменателѣ мы пренебрежемъ членами $r_1 x_3' \sin \gamma$, $r_1 x_2' \sin 2\gamma$, $-r_1 r_2' \cos 2\gamma$ и $x_1 r_2' \sin 2\gamma$, какъ очень малыми, а у членовъ $\frac{c_2}{c_1} x_3' x_2' \cos \gamma$, $x_1 x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right)$ и $x_1 x_2' \cos 2\gamma$ будемъ считать $\cos \gamma$ и $\cos 2\gamma$ за 1. Въ числителѣ выраженія радиуса мы приравниваемъ $\gamma=0$ и кромѣ того мы въ большинствѣ случаевъ можемъ пренебречь и $r_2'^2$, тогда получаютъ слѣдующія простыя выраженія:

$$\rho = \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' + x_3' + x_2}{q \cdot \left[2 \frac{c_2}{c_1} x_3' \{x_3' + (r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2')\} + 2 \cdot x_1 (x_3' + x_2') \right]}, \quad (23a)$$

$$\xi_0 = \frac{x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2'}{q \cdot \left[2 \frac{c_2}{c_1} x_3' \{ x_3' + (r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2') \} + 2 x_1 (x_3' + x_2') \right]}, \quad (23b)$$

$$\eta_0 = \frac{x_3' \cos \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) + x_2'}{q \cdot \left[2 \frac{c_2}{c_1} x_3' \{ x_3' + (r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2') \} + 2 x_1 (x_3' + x_2') \right]}. \quad (23c)$$

Произвольный вектор AT представляет кажущуюся проводимость всей цепи мотора

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{z_1 + \frac{1}{Y_{2v} + y_a}}$$

Точкам K' , C' и ∞ прямой K_p' соответствуют точки K , C и A круга K_p .

При постоянном напряжении на клеммах P_1 первичный ток $J_1 = P_1 \cdot Y_0$ и следовательно наша диаграмма представляет в известном масштабѣ диаграмму первичного тока. Такъ какъ напряжение на клеммах совпадаетъ съ положительнымъ направлениемъ оси абсциссъ, то каждый векторъ AT представляет по величинѣ и направлению первичный токъ, его абсцисса TH представляет ваттный токъ $J_1 \cos \varphi_1$, а ордината AH безваттный $J_1 \sin \varphi_1$. Уголъ же, составляемый векторомъ AT съ осью абсциссъ—уголъ сдвига фазъ между E_1 и J_1 . При пускѣ въ ходъ первичный токъ представляется векторомъ AK , при синхронизмѣ AC и при бесконечно большомъ числѣ оборотовъ точкой A т. е. равенъ нулю.

7. Намагничивающій и вторичный токи въ круговой диаграммѣ.

При $v = \infty$ моторъ не получаетъ и не отдаетъ энергии во внешнюю цепь, $J_1 z_1 = 0$ и электродвижущая сила индуктирующаяся въ статорѣ E_1 равна приложенному напряжению на клеммахъ P_1 . Въ роторѣ въ это время циркулируетъ токъ $J_2' v = \infty$ равный намагничивающему току $J_{av} = \infty = \frac{P_1}{\frac{c_2}{c_1} x'_{np}} = \frac{P_1}{x'_{nd}}$ и отстающій следовательно отъ P_1

на уголъ $\frac{\pi}{2} - \gamma$. При уменьшеніи v $J_1 \cdot z_1$, а следовательно, E_1 и J_a

движутся по кругамъ, положеніе которыхъ опредѣляется путемъ слѣдующихъ простыхъ разсужденій.

Пусть (рис. 14) K_{p_2} представляетъ извѣстный намъ кругъ первичныхъ силъ тока, AP_1 напряженіе на клеммахъ. Возьмемъ наибольшую силу тока AT_m , построимъ отъ точки P_1 $P_1 b = J_1 x_1$ перпендикулярно къ AT_m и $bt_m = J_1 r_1$ параллельно AT_m , получаемъ $P_1 t_m = J_1 z_1$ подъ угломъ ψ_1 къ AT_m ,

гдѣ $\psi_1 = \text{arctg} \frac{r_1}{x_1}$, тогда AT_m представ-

ляетъ E_1 электродвижущую силу, индуктирующуюся въ статорѣ при наибольшемъ токѣ. По окружности, имѣющей своимъ діаметромъ $P_1 t_m$ и движутся при измѣненіи $v = J_1 z_1$ и E_1 . Откладывая

подъ угломъ $\frac{\pi}{2} - \gamma$ къ AP_1 намагничивающій токъ $J_{ac} = \infty = Aa$, проводя изъ точки a подъ угломъ $\varepsilon - \psi_1$ къ Aa прямую и откладывая на ней отрѣ-

зокъ $at_{m_1} = \frac{P_1 t_m \cdot Aa}{AP_1} = \frac{J_1 z_1}{P_1} Aa = Y_{s, \text{max}} \cdot z_1 Aa$ и описывая на at_{m_1}

окружность, получаемъ геометрическое мѣсто, по которому движется конецъ вектора намагничивающаго тока съ измѣненіемъ v . При этомъ, въ то время какъ первичный токъ движенія по верхней части окружности, E_1 движется по лѣвой, а J_a по нижней, и наоборотъ.

Вторичный токъ, представляющій геометрическую разность первичнаго и намагничивающаго, движется обоими своими концами: однимъ по кругу первичнаго тока K_{p_2} , другимъ по кругу намагничивающаго тока K_{p_1} .

Нетрудно показать, что подобный векторъ можетъ быть замѣненъ векторомъ, одинъ конецъ котораго неподвиженъ, а другой движется по кругу, діаметръ котораго представляетъ геометрическую сумму соответствующихъ діаметровъ K_{p_2} и K_{p_1} . Въ самомъ дѣлѣ, пусть (рис. 15) у насъ имѣются два такихъ круга K_{p_2} и K_{p_1} съ двумя соответствующими другъ другу діаметрами AB и ab . Проведемъ изъ точки B линію, параллельную ab и отложимъ на ней отрѣзокъ $BB_2 = ab$: на линіи AB_2 , какъ на діаметрѣ построимъ окружность. Тогда всякій векторъ изъ точки a къ окружности круга K_{p_2} равенъ по величинѣ и направленію вектору между соответствующими точками круговъ K_{p_1} и K_{p_2} . Въ самомъ дѣлѣ, такъ какъ каждая хорда AE_2 круга K_{p_2} равна геометрической суммѣ соответствующихъ хордъ круговъ K_{p_1} и K_{p_2} AE

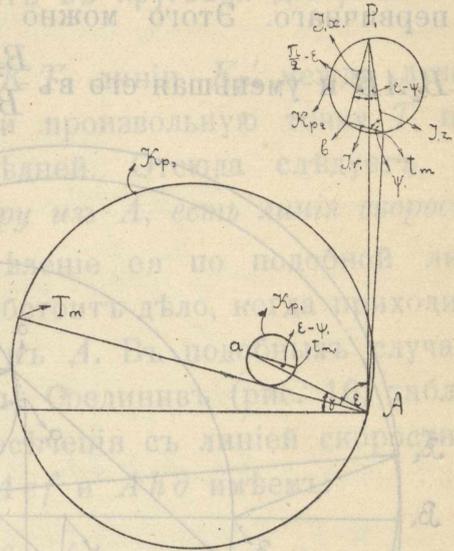


Рис. 14.

и ae , то Ee равно и параллельно ae , а слѣдовательно также и aE_2 равно и параллельно Ee .

Само собой разумѣется, что гораздо удобнѣе, когда конецъ вектора вторичнаго тока движется по тому же кругу K_{p_2} , какъ и векторъ первичнаго. Этому можно достигнуть вращая кругъ K_{p_2} на уголъ B_2AB и уменьшая его въ $\frac{B_2A}{BA}$ разъ. Для нахождения точки a_0 непод-

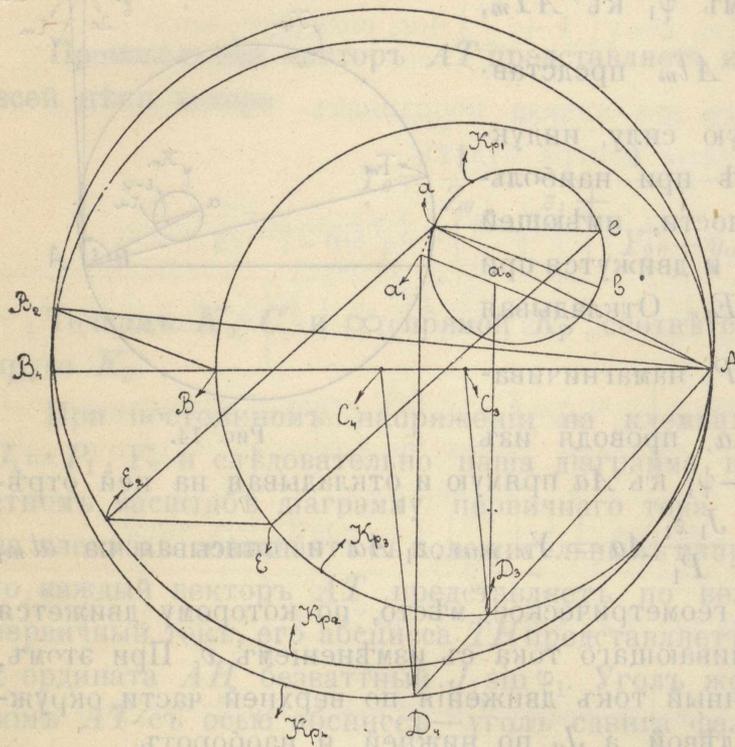


Рис. 15.

вижнаго центра всѣхъ векторовъ вторичнаго тока можно поступать слѣдующимъ образомъ: повернуть на уголъ вращенія B_2AB прямую Aa , произвольную точку D_4 круга K_{p_4} , описаннаго на B_4A , какъ на диаметръ, соединить съ a_1 — новымъ положеніемъ точки a послѣ вращенія и изъ D_3 круга K_{p_3} , соответствующей D_4 круга K_{p_4} , провести параллельную; точка a_0 пересѣченія ея съ Aa_1 и есть центръ векторовъ вторичнаго тока. Это видно изъ слѣдующаго: пусть D_3 и D_4 соответствующія точки круговъ K_{p_3} и K_{p_4} ; изъ подобія треугольниковъ AD_3C_3 и AD_4C_4 слѣдуетъ, что онѣ лежатъ на одной прямой AD_3D_4 , а изъ подобія треугольниковъ AD_3a_0 и AD_4a_1 слѣдуетъ, что a_0 какъ разъ и есть искомая точка.

Векторъ a_0D по величинѣ меньше истиннаго значенія вектора вторичнаго тока въ $\frac{AB_2}{AB} = \frac{\sqrt{(AB)^2 + (ab)^2 + 2AB \cdot ab \cdot \cos B_2BA}}{AB}$ разъ, а

по фазѣ отстаетъ отъ послѣдняго на уголъ BAB_2 . Уголъ $B_2BB_4 = \psi_1 - \frac{\pi}{2} + \gamma$ (см. рис. 14), уголъ $ABB_2 = \pi - \psi_1 - \gamma + \frac{\pi}{2}$, откуда

$$\angle B_2AB_4 = \arcsin \frac{BB_2 \sin \left(\gamma + \psi_1 - \frac{\pi}{2} \right)}{B_2A}.$$

Такъ какъ уголъ наклона между соответствующими діаметрами ab и AB очень малъ, а также невелики обыквенно по сравненію съ AB ab

вижнаго центра всѣхъ векторовъ вторичнаго тока можно поступать слѣдующимъ образомъ: повернуть на уголъ вращенія B_2AB прямую Aa , произвольную точку D_4 круга K_{p_4} , описаннаго на B_4A , какъ на диаметръ, соединить съ a_1 — новымъ положеніемъ точки a послѣ вращенія и изъ D_3 круга K_{p_3} , соответствующей D_4 круга K_{p_4} , провести параллельную; точка a_0 пересѣченія ея съ Aa_1 и есть центръ векторовъ вторичнаго тока. Это видно

и Aa_1 , то въ большинствѣ случаевъ точка a_0 находится дѣленіемъ линіи Aa на части aa_0 и a_0A , находящіяся въ отношеніи

$$aa_0 : Aa_0 = ab : AB.$$

8. Скорость, сдвигъ фазъ и моментъ въ круговой діаграммѣ.

Въ § 6 мы видѣли, что отрѣзокъ $K'T'$ линіи K_p' между лучами изъ точки A , проходящими черезъ K и произвольную точку T , пропорціоналенъ скорости въ этой послѣдней. Отсюда слѣдуетъ, что каждая линія, перпендикулярная диаметру изъ A , есть линія скорости.

При небольшихъ скоростяхъ опредѣленіе ея по подобной линіи не представляетъ затрудненій; иначе обстоитъ дѣло, когда приходится опредѣлять скорости точекъ близкихъ къ A . Въ подобныхъ случаяхъ можно поступать слѣдующимъ образомъ. Соединивъ (рис. 16, табл. II) d съ A и b и продолживъ Ad до пересѣченія съ линіей скорости въ точкѣ e , изъ подобія треугольниковъ Aef и Ahd имѣемъ:

$$\frac{fe}{db} = \frac{v \cdot ki + kf}{\partial b} = \frac{fA}{\partial A}$$

откуда

$$v = \frac{fA \cdot \partial b}{\partial A \cdot ki} - \frac{kf}{ki}.$$

Этимъ же способомъ нетрудно найти также точку по данной скорости.

Уголъ сдвига фазъ между напряженіемъ на клеммахъ и первичнымъ токомъ представляется на діаграммѣ непосредственно угломъ между векторомъ AT и осью абсциссъ. Коэффициентъ мощности $\cos \varphi_1$ получается въ видѣ отрѣзка At_1 на AT , если по оси абсциссъ отложить отрѣзокъ $Al=1$ и на немъ, какъ на диаметръ описать полуокружность.

Вращающій моментъ, какъ мы видѣли, складывается изъ двухъ моментовъ: M_{np} —продольной катушки въ поперечномъ полѣ и M_{nd} —поперечной катушки въ продольномъ полѣ, причемъ доминирующую роль играетъ первый.

$$M_{np} = k_1 \Phi_{np} \cdot J_2 \cos \gamma = k J_2^2 \cos \gamma, \text{ а } M_{nd} = k_1 \Phi_{nd} \cdot J_2 \cos (\Phi_{nd} J_2) = \\ = k \cdot J_2 J_a \cos (\Phi_{nd}, J_2),$$

гдѣ k_1 и k —постоянныя, опредѣляемыя ниже.

Такимъ образомъ результирующій моментъ мотора

$$M = k [J_2^2 \cos \gamma + J_2 J_a \cos (\Phi_{nd}, J_2)].$$

и которая, очевидно, проходитъ черезъ начало координатъ. Уголъ наклона этой прямой къ оси абсциссъ опредѣляется, какъ

$$\delta_m = \text{arctg} \frac{2 \cos \gamma (X_0 - X_a)}{2 \cos \gamma (Y_0 - Y_a) - J_a}. \quad (25)$$

Не трудно видѣть, что эта линия пересѣкаетъ кругъ въ двухъ точкахъ: A и въ точкѣ d , гдѣ

$$J_2 \cos \gamma = J_a \cos (\Phi_{nd}, J_2)$$

Отсюда чрезвычайно простое построение ея. Стоитъ лишь изъ точки a радіусомъ $\frac{J_a}{\cos \gamma}$ засѣчь кругъ, получается вторая точка линии моментовъ.

Что касается до выраженія $\sqrt{(X_0 - X_a)^2 + \left[(Y_0 - Y_a) + \frac{J_a}{2 \cos \gamma} \right]^2}$, то оно, очевидно, представляется линіей OD , гдѣ точка D получается пересѣченіемъ перпендикуляра къ отрѣзку Aa , изъ середины послѣдняго съ линіей параллельной оси ординатъ изъ точки a .

Такимъ образомъ вращающій моментъ представляется произведеніемъ $2 \cos \gamma k$ на отрѣзокъ OD и на разстояніе TE соответствующей точки круга T отъ прямой AE .

$$M = 2 \cos \gamma k \cdot OD \cdot TE \quad (26)$$

Уголъ наклона линіи OD къ оси ординатъ выражается

$$\angle \delta_{0D} = \text{arctg} \frac{X_0 - X_a}{Y_0 - Y_a - \frac{J_a}{2 \cos \gamma}},$$

т. е. тотъ же, что и линіи моментовъ къ оси абсциссъ. Такимъ образомъ, отрѣзокъ OD перпендикуляренъ къ AE . Отсюда еще одно простое построение линіи моментовъ. Если продолжить OD до пересѣченія съ окружностью a точкѣ b и отложить $bd = Ab$, то получаемъ вторую точку линіи моментовъ.

При наличности первичной реакціи и сопротивленія, возбуждающій токъ и продольный магнитный потокъ, какъ мы видѣли, движутся по кругамъ, поэтому линія моментовъ не представляетъ уже точной прямой. Но такъ какъ съ одной стороны колебанія возбуждающаго тока и продольного потока очень не велики, а съ другой они вліяютъ только на второй членъ въ суммѣ моментовъ, самъ по себѣ небольшой по сравненію съ первымъ, то мы сдѣлаемъ чрезвычайно небольшую ошибку, если примемъ за линію моментовъ прямую получаю-

щуюся слѣдующимъ образомъ. Допустимъ, что для мотора съ первичнымъ реактивнымъ и омическимъ сопротивленіями продольный магнитный потокъ совпадаетъ съ направлениемъ оси ординатъ, а намагничивающій токъ неподвиженъ и совпадаетъ съ векторомъ Oa_0 (рис. 16), гдѣ a_0 — центръ векторовъ вторичнаго тока, тогда линия моментовъ mt получается только что описаннымъ способомъ.

9. Потери, мощность и коэффициентъ полезнаго дѣйствія въ круговой діаграммѣ.

Первичная мощность Абсцисса любой точки круга представляетъ, какъ было указано выше, ваттный токъ $J_1 \cos \varphi_1$ и, слѣдовательно, при постоянномъ напряженіи на клеммахъ въ извѣстномъ масштабѣ подаваемую мотору мощность

$$W_1 = F_1 \cdot J_1 \cos \varphi_1.$$

Ось ординатъ служить, такимъ образомъ, линіей первичной мощности, и разстояніе точки T отъ нея пропорціонально W_1 .

Линія первичной мощности пересѣкаетъ кругъ въ двухъ точкахъ A и B (рис. 16, табл. II) для которыхъ $W_1 = 0$, она дѣлитъ этими точками кругъ на двѣ части: верхнюю — моторную, въ которой мощность положительна, т. е. подводится, и нижнюю генераторную, въ которой мощность отрицательна, т. е. отдается.

Потери въ обмоткѣ статора. По примѣру Bragstad'a и La Cour'a мы представляемъ потери въ статорѣ пропорціональными разстоянію точекъ окружности отъ такъ называемой полуполяры, т. е. линіи, параллельной полярѣ и проходящей черезъ середину касательной изъ неподвижнаго центра векторовъ. Такъ какъ въ нашемъ случаѣ центръ векторовъ первичнаго тока лежитъ на самой окружности, то полуполяра превращается въ касательную къ точкѣ A окружности. Перпендикуляръ изъ произвольной точки окружности T на эту касательную

$$TL = \frac{J_1^2}{2OA} = \frac{J_1^2}{J_{1max}},$$

такъ что первичныя потери въ обмоткѣ статора

$$V_1 = J_1^2 r_1 = 2 \cdot q^2 \cdot \overline{OA} \cdot LT \cdot r_1 = q J_{1max} \cdot r_1 \cdot \overline{LT}, \quad (27)$$

гдѣ q масштабъ первичнаго тока.

Потери въ обмоткѣ ротора. Вторичный токъ имѣетъ своимъ подвижнымъ центромъ точку a_0 и его потери представляются опять таки TM , разстояніемъ точекъ окружности отъ полуполяры къ точкѣ

P. Последняя представляетъ изъ себя пересѣченіе касательныхъ къ точкамъ a_1 и a_2 , которыя получаются, какъ пересѣченіе съ окружностью K_p линіи $a_1 a_2$, проходящей черезъ неподвижный центръ векторовъ J_2 и перпендикулярной къ Oa_0 . Поэтому потери въ обмоткѣ ротора

$$V_2 = J_2^2 r_2 = 2 s^2 \overline{Oa_0} r_2 \overline{TM}, \quad (28)$$

гдѣ s масштабъ вторичнаго тока.

Потери въ желѣзѣ отъ поперечнаго поля. Поперечное поле ротора принято нами пропорціональнымъ вторичному току и, слѣдовательно, линіей потерь въ желѣзѣ отъ поперечнаго поля будетъ служить та же самая линія потерь въ обмоткѣ ротора. Измѣняется лишь постоянная, опредѣляющаяся слѣдующимъ образомъ. Какъ мы имѣли выше,

$$E_{nc}'' = J_2 x_{np} \cos \gamma = J_2 \cos \gamma \frac{x_{nd}}{c_2}.$$

Поэтому потери въ желѣзѣ

$$V_{a_2} = g_{np} E^2 = \frac{c_2}{c_1} g_a \left(\frac{x_{nd}}{c_2} \cos \gamma \right)^2 J_2^2 = \frac{g_a}{\frac{c_2}{c_1} (b_a^2 + g_a^2)} J_2^2 = \frac{c_1}{c_2} r_a J_2^2.$$

Въ діаграммѣ онѣ представляются отрѣзками TM и равны

$$V_{a_2} = 2 s^2 \frac{c_1}{c_2} r_a \overline{Oa_0} \overline{TM} \quad (26)$$

Потери въ желѣзѣ отъ продольнаго поля. Подобнымъ образомъ мы можемъ представить и потери отъ продольнаго поля отрѣзкомъ tq между окружностью k_p , по которой движется конецъ намагничивающаго тока, и полуполярой къ ней qr изъ неподвижнаго центра послѣдняго A . Эти потери равны

$$V_{a_1} = J_a^2 \frac{g_a}{g_a^2 + b_a^2} = J_a^2 \cdot r_a = 2 q^2 r_a \cdot \overline{oA} \cdot \overline{tq}. \quad (30)$$

Но такъ какъ съ одной стороны кругъ K_p бываетъ обыкновенно очень малъ, а съ другой для удобства дальнѣйшаго построения діаграммы нужно, чтобы всѣ точки находились на окружности K_p , мы окружность k_p повернемъ на соотвѣтствующій уголъ и увеличимъ ее до окружности K_p . Тогда точка A займетъ положеніе A_1 (см. рис. 18 табл.

I, представляющей рис. 16 въ меньшемъ масштабѣ), полуполюара qr положеніе QR и потери отъ продольнаго поля

$$\begin{aligned} V_{a_1} &= 2q^2 r_a \cdot OA_1 \cdot TQ \left(\frac{ot}{OT} \right)^2 = 2q^2 r_a OA_1 \cdot TQ \left(\frac{z_1}{P_1} J_{av=\infty} \right)^2 = \\ &= 2q^2 r_a OA_1 \cdot TQ \cdot z_1^2 y_{av=\infty}^2 \end{aligned} \quad (31)$$

Мощность, отдаваемая ротору, равна мощности, получаемой статоромъ, минусъ потери въ послѣднемъ $W_a = W_1 - J_1^2 r_1 - J_a^2 r_a$ и представляется также разстояніемъ точекъ круга отъ прямой линіи. Положеніе ея опредѣляется точками пересѣченій ея съ кругомъ, для которыхъ $W_a = 0$.

Выше (стр. 22) мы видѣли, что въ кругѣ K_p'' точки g'' и h'' представляютъ точки, для которыхъ мощность, подаваемая ротору, равна нулю. На кругѣ K_p этимъ точкамъ будутъ соответствовать точки g и h , поэтому прямая gh и представляетъ линію мощности, получаемой роторомъ.

Суммарныя потери статора $V_c = J_1^2 r_1 + J_a^2 r_a$ представляются разстояніемъ точекъ круга отъ линіи $S_1 U$ (рис. 16), проходящей черезъ S_1 , точку пересѣченія LA и RQ (рис. 18), и черезъ точку пересѣченія U линій hg и BA (рис. 16).

Мощность, отдаваемая роторомъ, равна мощности, получаемой имъ минусъ потери въ немъ: $W_2' = W_a - J_2^2 \left(r_2' + r_a \frac{c_1}{c_2} \right)$; и представляется разстояніемъ точекъ круга отъ прямой, проходящей черезъ точки, въ которыхъ $W_2' = 0$. Положеніе этихъ точекъ опредѣляется уравненіемъ

$$\begin{aligned} W_2' = W_a - V_2 - V_{a_2} &= EJ_2 \cos \varphi_2 - J_2^2 r_2' - J_2^2 r_a \frac{c_1}{c_2} = J_2^2 (Rv - r_2' - g_{np} x'^2) = \\ &= J_2^2 \cdot \left[\frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \cdot \{ r_2' + c_1 x_2' v + (c_1 + c_2) \cos \gamma x_3' v + \sin \gamma x_3' (1 - c_2 c_1 v^2) \} - \right. \\ &\quad \left. - r_2' - x_3' \sin \gamma \right] = \end{aligned}$$

$$J_2^2 \cdot \frac{1}{1 + (c_1 v)^2} \{ c_1 v x_2' - r_2' c_1^2 v^2 + v x_3' \cos \gamma (c_1 + c_2) - x_3' \sin \gamma c_1 v^2 (c_1 + c_2) \}.$$

Изъ послѣдняго выраженія видно, что W_2' равно нулю: 1) когда $v=0$ т. е. въ точкѣ K и 2) когда

$$v [x_3' \sin \gamma c_1 (c_2 + c_1) + c_1^2 v_2'] = c_1 x_2' + x_3' \cos \gamma (c_2 + c_1),$$

т. е. при

$$v = \frac{c_1 x_2' + x_3' \cos \gamma (c_2 + c_1)}{c_1^2 r_2' + x_3' \sin \gamma (c_2 + c_1) \cdot c_1} \quad (32)$$

Такимъ образомъ вторая точка строится по вычисленной скорости.

Такъ какъ моментъ $M = W_2' : 2\pi \frac{n}{60}$, то при $W_2' = 0$ и конечной скорости онъ также равенъ нулю, слѣдовательно, линия моментовъ пересѣкаетъ окружность въ той-же точкѣ, гдѣ и линия механической мощности, что даетъ возможность избѣгнуть вычисления этой точки, когда она уже получена для линии моментовъ.

Суммарныя потери въ роторъ $V_p = J_2'^2 \left(r_2 + \frac{c_1}{c_2} r_a \right)$ представляются очевидно разстояніемъ точекъ окружности отъ линіи MN .

Такъ какъ $W_2' = W_a - V_p$, то три линіи представляющія W_2' , W_a и V_p — JK , gh и MN должны пересѣкаться въ одной точкѣ S_3 *); это свойство служить для контроля правильности построения

Суммарныя потери всего мотора $V_s = V_e + V_p$ опредѣляются разстояніемъ точекъ окружности отъ линіи FD , проходящей, во первыхъ, черезъ точку пересѣченія линій S_2 MN и S_1 U (рис. 18 т. I) и, во вторыхъ, черезъ точку D пересѣченія линій KJ и AB (рис. 16).

Опуская перпендикуляръ G_2 OG (рис. 16) изъ точки O на линію KJ , мы получаемъ наибольшую механическую мощность мотора въ видѣ отрѣзка абсциссы между точкой G_1 и линіей KJ и для генератора между G_2 и JK .

Подобнымъ же образомъ отрѣзокъ абсциссы черезъ O между E_1 и ось ординатъ даетъ наибольшую электрическую мощность, поглощаемую моторомъ, а подобный же отрѣзокъ между E_2 и AB наибольшую электрическую мощность, отдаваемую генераторомъ.

Коэффициентъ полезнаго дѣйствія $\eta = \frac{W_2'}{W_1} = \frac{W_1 - V_s}{W_1}$ строится слѣдующимъ образомъ. Проведемъ на нѣкоторомъ разстояніи подъ осью ординатъ прямую параллельную ей и отрѣзокъ ея между линіями KJ и FD раздѣлимъ на 100 частей, тогда продолженіе линіи соединяющей произвольную точку окружности съ точкой D , пересѣченія линій KJ и FD , отсѣкаетъ на этой параллели отрѣзокъ, представляющій въ процентахъ коэффициентъ полезнаго дѣйствія мотора.

Когда точка T совпадетъ съ K и A , то лучъ TD совпадетъ съ KJ , коэффициентъ полезнаго дѣйствія $\eta = 0$, когда лучъ DT касателенъ къ окружности K_p , коэффициентъ полезнаго дѣйствія имѣетъ наибольшее значеніе.

*) См. Arnold. W. T., B. I.

10. Непосредственное построение круговой диаграммы.

Въ § 6 мы видѣли, что радиусъ и координаты центра круга K_p опредѣляются формулами 24а, 24б и 24с. Вводя въ нихъ обозначенія:

$$x_4' = \frac{c_2}{c_1}, \quad x_3' = \frac{c_2}{c_1} \cdot x'_{np} \cdot \cos \gamma = x'_{nd} \cdot \cos \gamma, \quad x_{II} = x_3' + x_2', \quad x_{III} = x_4' + x_3' + x_2', \\ r_s = r_1 + r_2' \quad \text{и} \quad x_s = x_1 + x_2', \quad \text{получаемъ}$$

$$\rho = \frac{x_{III}}{2x_4'(x_3' + r_s \sin \gamma + x_s) + 2x_1 x_{II}}, \quad (33a)$$

$$\xi_0 = \frac{(x_3' + x_4') \sin \gamma - r_2'}{2x_4'(x_3' + r_s \sin \gamma + x_s) + 2x_1 x_{II}}, \quad (33b)$$

$$\eta_0 = \frac{(x_3' + x_4') \cos \gamma + r_2'}{2x_4'(x_3' + r_s \sin \gamma + x_s) + 2x_1 x_{II}}. \quad (33c)$$

По этимъ формуламъ и можетъ быть полученъ непосредственно кругъ K_p .

Въ томъ же параграфѣ мы нашли, что абсцисса точки T' въ системѣ координатъ съ началомъ въ точкѣ A' выражается формулой 22; замѣняя въ ней $\cos \gamma$ и $\cos 2\gamma$ единицей и пренебрегая членами $r_2'^2 \sin \gamma$, $2x_3' r_2' \sin^2 \gamma$, $c_2 v x_3' r_2' \sin 2\gamma$, $r_2'^2$ и $2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1}\right) r_2' \sin \gamma$, какъ небольшими, получаемъ послѣ нѣкоторыхъ преобразований

$$T'H' = \frac{\left\{ \sin \gamma \left[(x_2' + x_3')^2 + \frac{c_2}{c_1} x_3'^2 \right] + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' + c_2 v x_3' \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\} \frac{c_2}{c_1} x_3'}{\left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}.$$

Подобнымъ же образомъ мы найдемъ и ординату точки T' (рис. 12).

$$A'H' = \frac{1}{T'A'} \cos T'A'H' = \frac{1}{T'A'} \cdot \frac{OH' + \frac{\cos \gamma}{c_1} x_3'}{T'A'} = \frac{\frac{\cos \gamma}{c_1} x_3' + \frac{\cos \gamma}{Z_{2v}} + \frac{\cos \gamma}{c_1} x_3'}{(T'A')^2} = \\ = \frac{\left(X_{2v} \frac{c_2}{c_1} x_3' + Z_{2v}'^2 \cos \gamma \right) \frac{c_2}{c_1} x_3'}{c_1 x_3' + Z_{2v}'^2 + 2 \frac{c_2}{c_1} x_3' (X_{2v}' \cos \gamma + R_{2v}' \sin \gamma)}$$

Откуда подставляя значенія X'_{2v} , R'_{2v} и Z'_{2v} и дѣлая преобразования получаемъ

$$A'H = \frac{\left[\cos \gamma \left\{ r_2'^2 + x_2'^2 + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) + 2x_3' (r_2' \sin \gamma + x_2' \cos \gamma) \right\} + \right. \\ \left. + \frac{c_2}{c_1} x_3' x_2' - v c_2 x_3' (x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2' \cos 2\gamma + x_2' \sin 2\gamma) \right] \cdot \frac{c_2}{c_1} x_3'}{r_2'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right)^2 + 2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) (x_2' \cos \gamma + r_2' \sin \gamma)}$$

Пренебрегая членами $2x_3' r_2' \sin \gamma$, $r_2'^2$, $2x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) r_2' \sin \gamma$ и замѣняя $\cos \gamma$ единицей, послѣ небольшихъ преобразованій

$$A'H = \frac{\left\{ (x_2' + x_3') \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] - \right. \\ \left. - v c_2 x_3' \left[\sin \gamma x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2' \cos 2\gamma + x_2' \sin 2\gamma \right] \right\} \frac{c_2}{c_1} x_3'}{\left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}$$

Координаты точки T' въ системѣ координатъ съ началомъ въ точкѣ A будутъ:

$$AH_1' = \frac{-v \cdot c_2 \cdot x_3' \left[\sin \gamma x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2' \cos 2\gamma + x_3' \sin 2\gamma \right] \frac{c_2}{c_1} x_3'}{\left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2} + x_1, \quad (34)$$

$$T'H_1' = \frac{\left\{ \sin \gamma \left[(x_2' + x_3')^2 + \frac{c_2}{c_1} x_3'^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' + c_2 v x_3' \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\} \frac{c_2}{c_1} x_3'}{\left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2} + r_1, \quad (35)$$

а уголъ, который составляетъ векторъ AT' съ осью абсциссъ

$$\begin{aligned} & \left\{ (x_2' + x_3') \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] - v c_2 x_3' \left[\sin \gamma x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2' \cos 2\gamma + \right. \right. \\ & \left. \left. + x_2' \sin 2\gamma \right] \right\} \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' + x_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}{\left\{ \sin \gamma \left[(x_2' + x_3')^2 + \frac{c_2}{c_1} x_3'^2 \right] + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' + \right.} \\ \angle XAT = \angle \varphi_1 = \operatorname{arctg} & \left. \left. + c_2 v x_3' \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\} \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' + r_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}{\left. \right.} \right\}. \quad (36) \end{aligned}$$

При неподвижномъ положеніи якоря онъ будетъ

$$\begin{aligned} & \angle XAK = \angle \varphi_{1k} = \\ & \operatorname{arctg} = \frac{(x_2' + x_3') \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \frac{c_2}{c_1} x_3' + x_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}{\left\{ \sin \gamma \left[(x_2' + x_3')^2 + \frac{c_2}{c_1} x_3'^2 \right] + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' \right\} \frac{c_2}{c_1} x_3' + r_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2} = \\ & = \operatorname{arctg} \frac{x_{II} \cdot x_{III} \cdot x_4' + x_I \cdot x_{III}^2}{\left\{ \sin \gamma (x_{II}^2 + x_4' \cdot x_3') + x_4' r_2' \right\} x_4' + r_1 \cdot x_{III}^2}, \quad (36a) \end{aligned}$$

а при синхронизмѣ

$$\begin{aligned} & \left\{ (x_2' + x_3') \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] - c_2 x_3' \left[x_3' \sin \gamma \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) - r_2' \cos 2\gamma + \right. \right. \\ & \left. \left. + x_2' \sin 2\gamma \right] \right\} \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' + x_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}{\left\{ \sin \gamma \left[(x_2' + x_3')^2 + \frac{c_2}{c_1} x_3'^2 \right] + \right.} \\ \angle \varphi_{1c} = \angle XAC = \operatorname{arctg} & \left. \left. + \frac{c_2}{c_1} x_3' r_2' + c_2 x_3' \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right] \right\} \frac{\frac{c_2}{c_1} x_3' + r_1 \left[x_2' + x_3' \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) \right]^2}{\left. \right.} \right\} = \\ & \frac{x_{II} \cdot x_{III} \cdot x_4' + x_I x_{III} -}{-c_2 x_3' [(x_3' + x_4') \sin \gamma - r_2' \cos 2\gamma + x_2' \sin 2\gamma] x_4'} \\ = \operatorname{arctg} & \frac{\left[\sin \gamma (x_{II}^2 + x_4' x_3') + x_4' r_2' \right] x_4' + r_1 \cdot x_{III}^2 + c_2 x_3' x_{III} x_4'}{\quad} \quad (36b) \end{aligned}$$

Такимъ образомъ мы получаемъ точки K и C круга K_p . Вторичный и намагничивающій токи, линіи потерь, мощностей, моментовъ, скорости и коэффициентъ полезнаго дѣйствія получаются, какъ выше описано. Если не желаютъ строить линіи потерь, то коэффициентъ полезнаго дѣйствія съ достаточной точностью получается очень просто замѣной линіи суммарныхъ потерь мотора параллельной линіи скорости. Это

возможно вслѣдствіе того, что направленіе линіи суммарныхъ потерь мотора, при нормальномъ положеніи щетокъ, обыкновенно очень мало отличается отъ параллели къ линіи омическихъ потерь статора.

Подобнымъ образомъ построены діаграммы рис. 19, (т. II), 20 и 21 (т. III). Рис. 19 представляетъ діаграммы для тѣхъ-же данныхъ какъ и на рис. 16, но при различныхъ положеніяхъ щетокъ. Кругъ K_p (рис. 16 и 19) построенъ при $\lambda=19^\circ$, кругъ K_{p_I} (рис. 19) для $\lambda=11^\circ 30'$, кругъ $K_{p_{II}}$ при $\lambda=32^\circ$. Съ уменьшеніемъ λ , какъ это видно изъ рисунка, діаметръ круга сильно возрастаетъ, а точки K и C приближаются къ A . На рис. 20 представлены круговыя діаграммы, для крайнихъ положеній щетокъ, $K_{p_{90}}$ для $\lambda=90^\circ$ и K_{p_0} для $\lambda=0$, при чемъ масштабъ круга $K_{p_{90}}$ въ 5 разъ больше, чѣмъ K_{p_0} . На рис. 21 представлены 3 діаграммы при одномъ и томъ же положеніи щетокъ, но съ различнымъ $x_{нд}$. Кругъ K_p —тотъ-же, что и на рис. 16, кругъ $K_{p_{III}}$ съ $x_{нд}$, составляющимъ 0,725 отъ $x_{нд}$ въ кругѣ K_p , и кругъ $K_{p_{IV}}$ съ $x_{нд}$ въ 1,2 разѣ большимъ, чѣмъ $x_{нд}$ въ кругѣ K_p . Съ увеличеніемъ $x_{нд}$ діаметръ круга уменьшается, а точки K и C приближаются къ A .

11. Первичный, вторичный и намагничивающій токи мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ.

Какъ мы видѣли выше, вторичный токъ

$$J_2' = Y_{2v}' \cdot E_2' = Y_{2v}' \cdot E_1 = \frac{E_1}{Z_{2v}'},$$

намагничивающій токъ

$$J_a = y_a \cdot E_1$$

и первичный

$$J_1 = J_2' + J_a = E_1 (Y_{2v}' + y_a) = E_1 \left(\frac{1}{Z_{2v}'} + y_a \right) = P_1 \cdot Y_e = \frac{P_1}{z_1 + \frac{1}{Y_{v2} + y_a}} \quad (37)$$

Откуда

$$E_1 = \frac{P_1}{1 + \frac{z_1}{Z_{2v}'} + z_1 y_a} = \frac{P_1}{z_1 \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{Z_{2v}'} + y_a \right)} = \frac{P_1}{z_1 (y_a + Y_{2v}')} \quad (38)$$

$$J_a = \frac{y_a \cdot P_1}{1 + \frac{z_1}{Z_{2v}'} + y_a \cdot z_1} = \frac{y_a}{z_1} \cdot \frac{P_1}{(y_a + Y_{2v}')} \quad (39)$$

и

$$J_2' = \frac{P_1}{Z_{2v}'(1 + z_1 y_a) + z_1} = \frac{P_1}{z_1(Z_{2v}' y_1 + 1)} \quad (40)$$

$$\text{гдѣ } y_1 = y_a + \frac{1}{z_1} = y_a + y_1.$$

На рис. 22 (т. III) представлены въ прямоугольныхъ координатахъ, въ зависимости отъ скорости, для трехъ различныхъ угловъ сдвига щетокъ, первичный и вторичный токи, получающіеся изъ діаграммы рис. 19. Первичный токъ J_1 при $v = \infty$ равенъ нулю; съ уменьшеніемъ v медленно возрастаетъ, при нѣкоторомъ v становится равнымъ вторичному, затѣмъ больше его, между $v=1$ и $v=0$ возрастаетъ быстро, при нѣкоторой отрицательной скорости достигаетъ максимума и затѣмъ, уменьшаясь по мѣрѣ увеличенія v , при $v = -\infty$ становится равнымъ нулю. Вторичный токъ J_2' при $v = \infty$ равенъ намагничивающему J_a при разомкнутомъ роторѣ, съ увеличеніемъ скорости увеличивается, при нѣкоторой отрицательной скорости достигаетъ максимума и, уменьшаясь съ увеличеніемъ v , при $v = -\infty$ снова равенъ намагничивающему. Электродвижущая сила отъ пульсаціи продольнаго потока E_1 (въ прямоугольныхъ координатахъ не представлена) при $v = \infty$ равна приложенному напряженію P_1 , при уменьшеніи v уменьшается, достигаетъ минимума при нѣкоторой отрицательной скорости въ точкѣ, гдѣ J_1 имѣетъ максимумъ, увеличивается по мѣрѣ увеличенія $-v$, при нѣкоторой конечной скорости становится равной приложенному напряженію, затѣмъ больше его, переходитъ черезъ максимумъ и при $v = -\infty$ равна опять P_1 . Намагничивающій токъ въ своихъ измѣненіяхъ слѣдуетъ, конечно, за измѣненіями E_1 .

При поднятыхъ щеткахъ $Z_{2v}' = \infty$, и изъ ур. 37, 39 и 40 имѣемъ первичный токъ

$$J_1 = \frac{P_1}{z_1 + \frac{1}{y_a}} = \frac{P_1}{z_1 + z_a} = \frac{P_1}{z_1} = J_a,$$

гдѣ $z_1 = z_1 + z_a$, и вторичный токъ $J_2' = 0$.

При $\lambda = 90^\circ$ для моторовъ Томсона и Аткинсона и при $\lambda = 180^\circ$ для мотора Дери $c_1 = 0$, $c_2 = \infty$, Z_{2v}' , какъ это видно изъ форм. 12, при всѣхъ конечныхъ скоростяхъ равно безконечности, $J_1 = J_a = \frac{P_1}{z_1}$. Векторъ первичнаго тока J_1 движется по окружности (рис. 20 K_{p90}) съ радіусомъ:

$$\rho = \frac{x_{3,0} + x_2}{2 [x_4' (x_{3,0} + r_2 \sin \gamma + x_2) + x_1 (x_{3,0} + x_2)]} \approx \frac{1}{2 (x_1 + x_4')}$$

и координатами центра

$$\xi_0 = \frac{x_{3,0} \sin \gamma - r_2}{2 (x_1 + x_4') (x_{3,0} + x_2)}, \quad \eta_0 = \frac{x_{3,0} \cos \gamma + x_2}{2 (x_1 + x_4') (x_{3,0} + x_2)}.$$

Эти формулы получаются изъ 23а, 23b и 23с сокращениемъ на $u^2 \frac{c_2}{c_1} = 0$. При $v = \infty$ первичный токъ равенъ нулю. Приведенный вторичный токъ J_2' равенъ нулю при конечныхъ скоростяхъ и намагничивающему при $v = \infty$, а дѣйствительный вторичный токъ $J_2 = J_2'$ и при $v = 0$ равенъ нулю, а при $v = \infty$ безконечно великъ (такъ какъ при $\frac{c_2}{c_1} = 0$ $u = \infty$).

Съ уменьшениемъ угла сдвига щетокъ, діаметръ окружности увеличивается, и первичный и вторичный токи для всѣхъ конечныхъ скоростей увеличиваются; на рис. 22 представлены въ прямоугольныхъ координатахъ кривыя измѣненія токовъ, въ зависимости отъ скорости, для угловъ сдвига щетокъ въ 32° , 19° и $11^\circ 30'$.

При $\lambda = 0^\circ - x_3' = 0$ и радіусъ круга равенъ

$$\rho = \frac{x_4' + x_2'}{2 \{x_4' [(r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2')] + x_1 x_2'\}},$$

а координаты центра

$$\xi_0 = \frac{x_4' \sin \gamma - r_2'}{2 \{x_4' [(r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2')] + x_1 x_2'\}},$$

$$\eta_0 = \frac{x_4' \cos \gamma + x_2'}{2 \{x_4' [(r_1 + r_2') \sin \gamma + (x_1 + x_2')] + x_1 x_2'\}}.$$

Первичный токъ при $\lambda = 0^\circ$ и при $v = 0$, который можетъ быть названъ токомъ короткаго замыканія, получается изъ ур. 34 и 35

$$J_{1km} = \frac{P_1}{V (AH_1')^2 + (TH_1')^2} = \frac{P_1 \cdot (x_2' + x_4')^2}{V [x_4' x_2' (x_2' + x_4') + x_1 (x_2' + x_4')]^2 + [x_4' (x_2'^2 \sin \gamma + x_4' r_2') + r_1 (x_2' + x_4')]^2}$$

или, замѣняя $x_2'^2 \sin \gamma$ черезъ $x_2' r_2'$, имѣемъ

$$J_{1km} \approx \frac{P_1 (x_2' + x_4')}{V [x_4' \cdot x_2' + x_1 (x_2' + x_4')]^2 + [r_2' \cdot x_4' + r_1 (x_2' + x_4')]^2}.$$

Надо замѣтить, что это не наибольший возможный токъ мотора.

Намагничивающій токъ первичной цѣпи J_a при $v = \infty$ для всѣхъ положеній щетокъ имѣетъ одно и то же значеніе и при измѣненіи скорости, при различныхъ углахъ сдвига щетокъ, лишь только измѣняетъ амплитуду колебаній. Намагничивающій токъ вторичной цѣпи, равный $J_a \cdot u$, измѣняется въ зависимости отъ измѣненія u ; при $v = \infty$ и $\frac{c_2}{c_1} = 0$ онъ безконечно великъ.

На рис. 23 (т. III) представлены кривыя измѣненія первичнаго и дѣйствительнаго вторичнаго токовъ, въ зависимости отъ измѣненія угловъ сдвига щетокъ, при неподвижномъ роторѣ J_{1k} и J_{2k} (пунктиромъ) и при синхронизмѣ J_{1c} и J_{2c} , полученные изъ ряда круговыхъ діаграммъ. Мы видимъ, что при $\lambda = 90^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ $J_{1c} = J_{2k}$, объясненіе чему мы найдемъ позже. Кроме того, при большихъ углахъ сдвига щетокъ токъ при неподвижномъ роторѣ меньше, чѣмъ при синхронизмѣ.

Уравненія 23а, 23б и 23с показываютъ, что радіусъ круга, а, слѣдовательно, первичный и вторичный токи при одномъ и томъ же положеніи щетокъ увеличиваются съ уменьшеніемъ x_3' , x_1 , x_2' , r_1 , r_2' и γ . Сопротивленія первичной и вторичной цѣпей и уголъ γ не оказываютъ большого вліянія на радіусъ, но двѣ послѣднія величины r_2' и γ имѣютъ большое вліяніе на положеніе центра круга. Какъ мы видѣли, во всѣхъ діаграммахъ центръ круга лежитъ выше оси ординатъ, если же принять $\gamma = 0^\circ$, то онъ будетъ лежать ниже ея. Это обстоятельство и заставило автора принять во вниманіе уголъ γ , несмотря на то, что въ репульсионныхъ моторахъ, благодаря слабому насыщенію желѣза, онъ особенно малъ.

Рис. 21 иллюстрируетъ измѣненіе круговой діаграммы влѣдствіе измѣненія реакціи поперечной катушки при неизмѣнныхъ прочихъ постоянныхъ мотора и одномъ и томъ же положеніи щетокъ. Соответственно съ измѣненіемъ x_3' измѣняется, конечно, и намагничивающій токъ, уменьшаясь съ увеличеніемъ x_3' , и наоборотъ.

12. Вращающій моментъ мотора и вліяніе на него постоянныхъ.

Пусть въ синусоидальномъ магнитномъ полѣ abc (рис. 24) находится катушка, шириной $\beta\tau$ съ числомъ витковъ βw_2 , черезъ которые

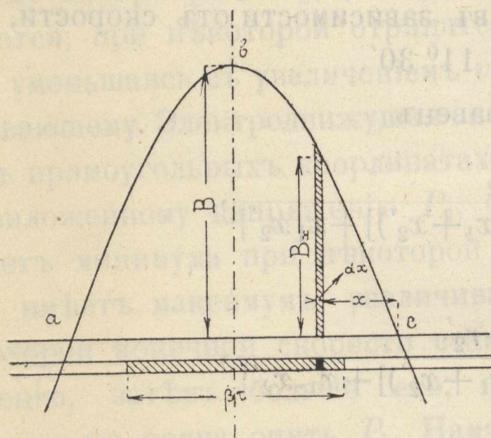


Рис. 24.

течетъ токъ J_2 . Сила взаимодействія между полемъ и катушкой для пары полюсовъ выражается въ kg:

$$F = 2 \cdot \frac{10^{-6}}{9.81} \cdot l \cdot 2 \int_{\frac{\tau - \beta\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x \cdot J_2 \sqrt{2} \frac{w_2}{\tau} dx =$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{9.81} \cdot l \cdot B \cdot J_2 \frac{w_2}{\tau} \int_{\alpha_0}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha \cdot \frac{D}{2} d\alpha.$$

Такъ какъ J_2 и B колеблются во времени по синусоидѣ и смѣщены на уголь ψ , то средняя сила взаимодействія

$$F = \frac{4 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-6}}{9.81 \cdot 2 \cdot 2} \cdot l \cdot D \cdot B \cdot J_2 \frac{w_2}{\tau} \sin(90 - \alpha_0) \cos \psi =$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-6} \cdot 2}{9.81 \pi} \cdot l \cdot B \cdot J_2 \cdot w_2 \cdot \cos \psi \cdot \sin(90 - \alpha_0),$$

а моментъ въ kgm., если D выражено въ см.,

$$M = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{9.81 \cdot 2} \cdot D^2 \cdot l \cdot B \cdot J_2 \frac{w_2}{\tau} \cdot \sin(90 - \alpha_0) \cos \psi =$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 9.81} \cdot D \cdot l \cdot B \cdot J_2 \cdot w_2 \cdot \sin(90 - \alpha_0) \cos \psi.$$

Такимъ образомъ моментъ продольной катушки въ поперечномъ полѣ для моторовъ Томсона и Аткинсона равенъ:

$$M_{np} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{9.81 \cdot \pi} \cdot D \cdot l \cdot B_{np} \cdot J_2 \cdot w_2 \cdot \cos \lambda \cdot \cos \gamma;$$

подставляя изъ форм. 6b и 2b значеніе

$$B_{np} = B_{mp} \cdot \frac{\pi^2}{12} \cdot \sin \lambda = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w_2 \sqrt{2} J_2 \cos \gamma}{\delta''} \cdot \frac{\pi^2}{12} \sin \lambda,$$

имѣемъ

$$M_{np} = \frac{10 \cdot 2 \cdot \pi^2}{9.81 \cdot 6} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} J_2^2 \cdot w_2^2 \sin 2\lambda \cdot \cos^2 \gamma,$$

а моментъ поперечной катушки въ продольномъ полѣ

$$M_{nd} = \frac{2 \cdot 10}{\pi \cdot 9,81} D \cdot l \cdot B_{nd} \cdot J_2 \cdot w_2 \cdot \sin \lambda \cos (B_{nd}, J_2).$$

Мы можемъ принять, что B_{nd} съ достаточнымъ приближеніемъ выражается формулой (точной при $v = \infty$), подобной для B_{np} :

$$B_{nd} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w_2 \sqrt{2} \cdot J_a \cdot \cos \gamma}{\delta''} \cdot \frac{\pi^2}{12} \cos \lambda$$

Подставляя это значеніе B_{nd} , получаемъ

$$M_{nd} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{6 \cdot 9,81} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot w_2^2 \cos \gamma \cdot J_2 \cdot J_a \cos (B_{nd}, J_2) \sin 2 \lambda.$$

Если токи выражены въ приведенныхъ значеніяхъ, то

$$M_{np} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 6} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2'^2 \cdot u^2 \cdot w_2^2 \cos^2 \gamma \sin 2 \lambda$$

и

$$M_{nd} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi}{9,81 \cdot 6} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2' \cdot J_a u^2 \cos (B_{nd}, J_2') w_2^2 \cos \gamma \sin 2 \lambda.$$

Для мотора Дери

$$M_{np} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10}{\pi \cdot 9,81} D \cdot l \cdot B_{np} \cdot J_2 \cdot w_2 \cos \gamma \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \lambda);$$

подставляя значеніе

$$B_{np} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w_2 \sqrt{2} \cdot J_2 \cos \gamma}{\delta''} \cdot \frac{\pi^2}{12} \sin \frac{\lambda}{2},$$

получаемъ

$$M_{np} = \frac{10 \cdot 2 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2^2 \cdot w_2^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot \sin \lambda \cos \frac{\lambda}{2};$$

и моментъ поперечной катушки въ продольномъ полѣ

$$M_{nd} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10}{\pi \cdot 9,81} D \cdot l \cdot B_{nd} \cdot J_2 w_2 \cos (B_{nd}, J_2) \sin \lambda.$$

Подставляя, какъ для моторовъ Томсона и Аткинсона, значеніе

$$B_{nd} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w_2 \sqrt{2} J_a \cos \gamma}{\delta''} \cdot \frac{\pi^2}{12} \cos \frac{\lambda}{2},$$

имѣемъ

$$M_{нд} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2 J_a \cos(B_{нд}, J_2) w_2^2 \cos \gamma \sin \lambda \cos \frac{\lambda}{2}.$$

При токахъ въ приведенныхъ значеніяхъ

$$M_{нр} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2'^2 \cdot u^2 w_2^2 \cos^2 \gamma \sin \lambda \cos \frac{\lambda}{2} \quad (41)$$

и

$$M_{нд} = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot J_2' J_a \cdot u^2 \cos(B_{нд}, J_2) w_2^2 \cos \gamma \sin \lambda \cos \frac{\lambda}{2} \quad (42)$$

Такимъ образомъ та постоянная, о которой говорилось въ § 8, для моторовъ Томсона и Аткинсона выражается

$$k = \frac{10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot w_2^2 \cdot u^2 \cdot \cos \gamma \sin 2\lambda, \quad (43a)$$

а для мотора Дери

$$k = \frac{2 \cdot 10 \cdot \pi^2}{9,81 \cdot 3} \cdot \frac{D \cdot l}{\delta''} \cdot w_2^2 \cdot u^2 \cos \gamma \sin \lambda \cos \frac{\lambda}{2} \quad (43b)$$

На рис. 25 (т. IV) представлены въ прямоугольныхъ координатахъ кривыя измѣненія вращающаго момента въ зависимости отъ скорости и при $\lambda=11^\circ 30'$, $\lambda=19^\circ$ и $\lambda=32^\circ$, получающіяся изъ діаграммы рис. 19. Какъ видно изъ этихъ кривыхъ, при $v = \infty$ моментъ равенъ нулю, при уменьшеніи скорости сначала отрицателенъ, потомъ переходитъ черезъ нуль и медленно возрастаетъ, незадолго до $v=1$ начинаетъ рѣзко увеличиваться, при $v=0$ имѣетъ значеніе, близкое къ максимальному, при небольшой отрицательной скорости переходитъ черезъ максимумъ, затѣмъ, уменьшаясь сначала рѣзко, а потомъ медленно, достигаетъ нуля при безконечно большой отрицательной скорости. Такимъ образомъ въ репульсионныхъ моторахъ наибольшій моментъ лежитъ внѣ его рабочей части.

При измѣненіи угла сдвига щетокъ моментъ также сильно измѣняется. При $\lambda=90^\circ$ для моторовъ Томсона и Аткинсона и $\lambda=180^\circ$ для мотора Дери онъ равенъ нулю, такъ какъ при этихъ углахъ постоянная k , J_2 и J_2' при конечныхъ скоростяхъ равны нулю, вслѣдствіе чего линия моментовъ должна проходить черезъ точку K , въ которую сливаются, какъ мы увидимъ ниже, всѣ остальные точки при конечныхъ скоростяхъ. Съ уменьшеніемъ угла сдвига щетокъ k , J_2 и

J_2' имѣютъ конечныя значенія, моментъ отъ нуля всрастаетъ, сначала медленно, затѣмъ быстро, достигаетъ максимума при очень небольшомъ углѣ сдвига щетокъ, затѣмъ рѣзко падаетъ до 0 при $\lambda=0$. Въ этомъ положеніи онъ также равенъ нулю, потому что токи J_2 и J_2' имѣютъ конечныя значенія, а постоянная k равна нулю.

При $\lambda < 0^\circ$ и $\lambda > 90^\circ$ для моторовъ Томсона и Аткинсона и для $\lambda < 0^\circ$ для мотора Дери постоянная k , какъ это нетрудно видѣть, мѣняетъ свой знакъ, моментъ становится отрицательнымъ, и моторъ мѣняетъ направленіе вращенія.

На рис. 23 представлены также кривыя измененія вращающаго момента въ зависимости отъ угла сдвига щетокъ, M_k при неподвижномъ положеніи мотора и M_c —для синхронизма. Изъ этихъ кривыхъ видно, что максимумъ момента при неподвижномъ положеніи ротора достигается при большемъ углѣ сдвига щетокъ (9°), чѣмъ момента при синхронизмѣ (4°).

Уголъ, который составляетъ линія моментовъ съ осью абсциссъ, колеблется въ неширокихъ предѣлахъ; поэтому для даннаго положенія щетокъ моментъ возрастаетъ съ увеличеніемъ діаметра круга K_p , слѣдовательно, (рис. 21) съ уменьшеніемъ x_3' , x_1 , x_2' и r_1 . Что касается r_2' и γ , то они, мало вліяя на измененіе момента отъ измененія радіуса круга, сильно вліяютъ на положеніе линіи моментовъ отъ измененія положенія центра круга.

13. Первичная и вторичная мощности мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ.

На рис. 26 (т. IV) представлены кривыя первичной и вторичной мощности въ зависимости отъ скорости для трехъ различныхъ угловъ сдвига щетокъ, получающіяся изъ діаграммы рис. 19. При $v = \infty$ первичная мощность равна нулю, а вторичная отрицательна, при уменьшеніи v обѣ медленно возрастаютъ, при чемъ кривая первичной мощности идетъ надъ кривой вторичной, при скорости, опредѣляемой форм. 32, вторичная мощность переходитъ черезъ нуль, при скоростяхъ близкихъ къ синхронизму обѣ кривыя начинаютъ возрастать скорѣе, достигаютъ максимума и, рѣзко падая при дальнѣйшемъ уменьшеніи скорости, переходятъ черезъ нуль—вторичная при $v=0$, а первичная при нѣкоторой отрицательной. Въ генераторной части роли кривыхъ мѣняются: отрицательная вторичная мощность дѣлается больше первичной. Съ увеличеніемъ отрицательной скорости мощности рѣзко возрастаютъ, достигаютъ максимума и при дальнѣйшемъ увеличеніи v

убываютъ; при $v = -\infty$ первичная равна нулю, а вторичная нѣкоторой отрицательной величинѣ.

Съ измѣненіемъ угла сдвига щетокъ мощности сильно измѣняются. При $\lambda = 90^\circ$ для моторовъ Томсона и Аткинсона и 180° для мотора Дери вторичная мощность равна нулю, такъ какъ вторичный токъ равенъ нулю, линия вторичной мощности обращается въ касательную (рис. 20) въ точкѣ K вслѣдствіе того, что скорость во второй точкѣ, гдѣ $W_2 = 0$,

$$v = \frac{c_1 x_2 u^2 + \frac{x_4' \cdot c_1^2}{c_2} \cos \gamma}{c_1 r_2 u^2 + \frac{x_4' \cdot c_1}{c_2} c_1^2 \sin \gamma} = 0$$

(такъ какъ здѣсь $u = \infty$, $c_2 = 0$, $c_1 = \infty$ и $\frac{u^2 c_2}{c_1^2} = 0$). Первичная мощность при такомъ положеніи щетокъ чрезвычайно мала. Съ уменьшеніемъ угла сдвига щетокъ, какъ первичная, такъ и вторичная мощности возрастаютъ, достигаютъ максимума при нѣкоторомъ положеніи щетокъ близкомъ къ продольной оси и затѣмъ съ уменьшеніемъ угла сдвига щетокъ рѣзко падаютъ, вторичная до 0 при $\lambda = 0$, а первичная до нѣкоторой довольно значительной величины, идущей только на покрытие потерь короткаго замыканія мотора.

На рис. 27 (т. IV) представлены кривыя первичной мощности $W_1 - I$ и вторичной $W_2' - II$ при синхронизмѣ въ зависимости отъ угла сдвига щетокъ, полученные изъ ряда круговыхъ діаграммъ; при чемъ кривая W_2' отличается отъ кривой моментовъ M_c рис. 23 очевидно только масштабомъ.

При $\lambda = 0$ $c_2 = \infty$, $c_1 = 0$ и скорость во второй точкѣ, гдѣ $W_2' = 0$, изъ форм. 32.

$$v = \frac{x_3' c_2 \cos \gamma}{x_2' c_2 c_1 \sin \gamma} = \infty,$$

линія вторичной мощности представляется прямой KA , но въ то-же самое время, какъ мы увидимъ ниже, всѣ точки при конечныхъ скоростяхъ сливаются съ точкой K , поэтому и отдаваемая мощность во всѣхъ точкахъ съ конечной скоростью равна нулю. Первичная мощность при $\lambda = 0$ представляется отрѣзкомъ KL (рис. 20), одинаковымъ для всѣхъ конечныхъ скоростей.

Съ измѣненіемъ x_2' , r_2' , x_3' и γ положеніе линіи вторичной мощности, какъ это видно изъ форм. 36 и 32, измѣняется очень мало (см. Рис. 21); поэтому съ уменьшеніемъ x_3' , x_2' и x_1 первичная и вторич

ная мощности увеличиваются. Что касается до r_2' и γ , то они, влияя очень слабо на вторичную мощность, увеличивают первичную со своимъ увеличеніемъ вслѣдствіе перемѣщенія оси ординатъ.

14. Коэффициенты мощности и полезнаго дѣйствія мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ.

На рис. 28 (т. IV) кривая I представляетъ измѣненіе коэффициента мощности, а II коэффициента полезнаго дѣйствія въ зависимости отъ скорости. Мы видимъ, что при $v=0 \cos \varphi_1$ имѣетъ конечное значеніе и съ увеличеніемъ скорости все время возрастаетъ до 1 при $v=\infty$. Въ дѣйствительности въ репульсионныхъ моторахъ $\cos \varphi_1$ имѣетъ максимумъ; это объясняется сильнымъ вліяніемъ на него ампервитковъ коротко замкнутой катушки. Коэффициентъ полезнаго дѣйствія равенъ нулю при скорости, опредѣляемой уравн. 32, медленно возрастаетъ, достигаетъ максимума при $v=1,75$ и затѣмъ падаетъ до нуля при $v=0$. Максимумъ коэффициента полезнаго дѣйствія получается, какъ это и слѣдуетъ ожидать, вслѣдствіе того, что потери въ желѣзѣ въ репульсионныхъ моторахъ невелики, при небольшихъ токахъ и, слѣдовательно, при большой скорости.

При $\lambda=90^\circ$, $u=\infty$, $c_2=0$, $c_1=\infty$ и углы φ_{1k} и φ_{1c} опредѣляются изъ уравн. 36

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \operatorname{tg} \varphi_c = \frac{(x_2 + x_{3,90})^2 x_4' + x_1 (x_2 + x_{3,90})^2}{\sin \gamma (x_2 + x_{3,90})^2 x_4' + r_1 (x_2 + x_{3,90})^2} = \frac{x_4' + x_1}{\sin \gamma x_4' + r_1},$$

этимъ же выраженіемъ опредѣляется и уголъ φ вообще при всякой конечной скорости; это происходитъ отъ того, что въ ур. 36 членъ, зависящій отъ скорости, равенъ нулю. По этой причинѣ коэффициентъ полезнаго дѣйствія при $\lambda=90^\circ$ при всѣхъ конечныхъ скоростяхъ равенъ нулю, такъ какъ всѣ точки окружности при конечныхъ скоростяхъ совпадаютъ съ K .

Съ уменьшеніемъ сдвига щетокъ коэффициентъ мощности и коэффициентъ полезнаго дѣйствія возрастаютъ, достигаютъ максимума при углахъ сдвига щетокъ, довольно близкихъ къ нулю, и затѣмъ оба рѣзко падаютъ до нуля при $\lambda=0$.

Кривыя III и IV рис. 27 представляютъ коэффициентъ мощности и коэффициентъ полезнаго дѣйствія при синхронной скорости въ зависимости отъ положенія щетокъ. Изъ этихъ кривыхъ видно, что для того, чтобы моторъ работалъ съ возможно большимъ коэффициентомъ мощности и полезнаго дѣйствія, щетки должны находиться въ предѣлахъ 10° — 25° отъ продольной оси.

При $\lambda=0$, $c_2=\infty$, $c_1=0$ $x_3'=0$ и углы φ_k , φ_c и вообще для точекъ съ конечной скоростью опредѣляются изъ ур. 36

$$tg \varphi_k = tg \varphi_c = \frac{x'_{2,0} (x'_{2,0} + x_4') x_4' + x_1 (x'_{2,0} + x_4')^2}{(x_2'^2 \sin \gamma + x_4' r_2') x_4' + r_1 (x_2' + x_4')^2},$$

такъ какъ и здѣсь множитель при членахъ зависящихъ отъ v равенъ нулю, т. е. здѣсь также всѣ точки окружности при конечныхъ скоростяхъ сливаются въ K , а коэффициентъ полезнаго дѣйствія при конечныхъ скоростяхъ равенъ нулю.

На рис. 30 представлены кривыя коэффициента полезнаго дѣйствія при $v=2$, $v=1.5$, $v=1.0$, $v=1.75$ и $v=0.5$ въ зависимости отъ измѣненія угла сдвига щетокъ. Какъ

изъ этихъ кривыхъ видно, максимумъ коэффициента полезнаго дѣйствія для данной скорости съ уменьшеніемъ ея перемѣщается къ большимъ угламъ сдвига щетокъ. На рис. 31 (см. стр. 52), для тѣхъ же пяти скоростей представлены кривыя коэффициента мощности въ зависимости отъ угла сдвига щетокъ. Надо однако замѣтить, что на кривыя коэффициента полезнаго дѣйствія, и въ особенности на кривыя мощности оказываетъ сильное вліяніе коротко замкнутая катушка, такъ что дѣйствительныя кривыя мотора отличаются отъ приведенныхъ на рис. 30 и 31 тѣмъ болѣе, чѣмъ дальше скорость мотора отъ синхронной.

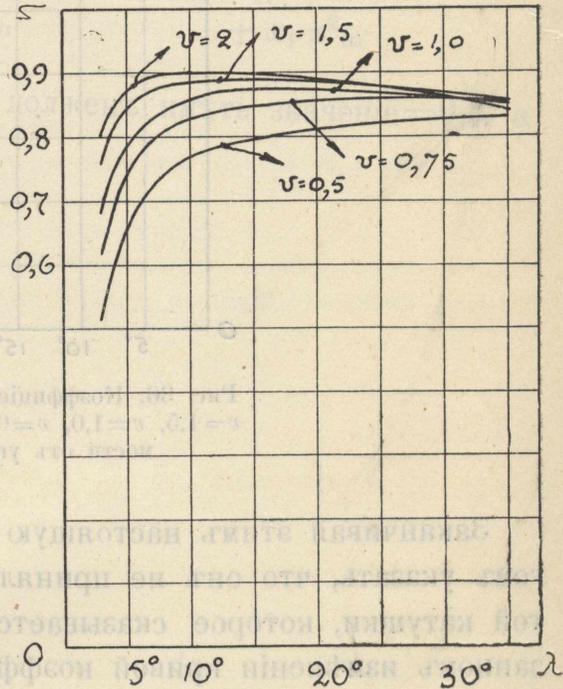


Рис. 30. Коэффициентъ полезнаго дѣйствія $v=2$, $v=1,5$ $v=1,0$, $v=0,75$ и $v=0,5$ въ зависимости отъ угла сдвига щетокъ.

Съ уменьшеніемъ x_3' , r_1 и γ и увеличеніи x_1 уголъ сдвига фазъ при синхронизмѣ φ_{1c} , какъ это можно видѣть изъ форм. 36 и диаграммы рис. 21, увеличивается, такъ что коэффициентъ мощности уменьшается. Коэффициентъ полезнаго дѣйствія при синхронизмѣ уменьшается съ уменьшеніемъ x_3' вслѣдствіе того, что точка синхронизма перемѣщается выше по кругу, и съ увеличеніемъ r_1 , r_2' и γ вслѣдствіе увеличенія потерь. Надо при этомъ замѣтить, что уменьшеніе коэффициента полезнаго дѣйствія отъ уменьшенія x_3' связано съ увеличеніемъ мощности.

Въ заключение на рис. 29 (т. IV) для нормального положенія щетокъ представлены кривыя первичнаго тока J_1 , скорости v , коэффициента полезнаго дѣйствія η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ въ зависимости отъ отдаваемой механической мощности.

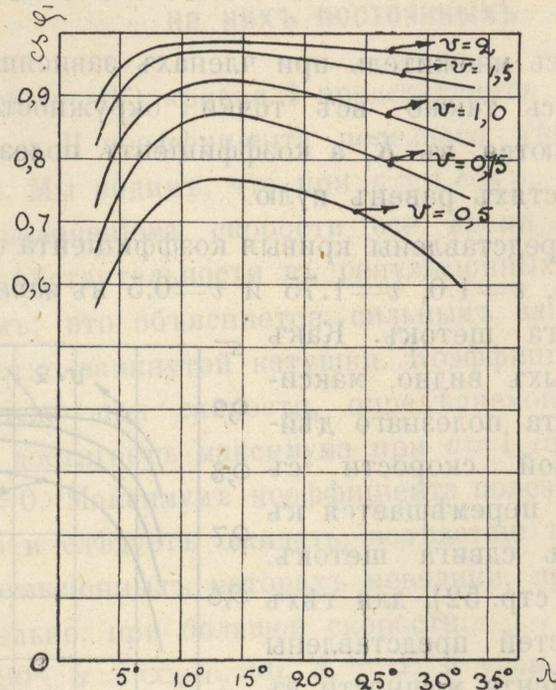


Рис. 36. Коэффициентъ мощности при $v=2$, $v=1,5$, $v=1,0$, $v=0,75$ и $v=0,5$ въ зависимости отъ угла сдвига щетокъ,

Заканчивая этимъ настоящую статью, авторъ считаетъ своимъ долгомъ указать, что онъ не принялъ во вниманіе вліяніе короткозамкнутой катушки, которое сказывается, главнымъ образомъ, въ вышеуказанномъ измѣненіи кривой коэффициента мощности. Выясненію этого вліянія авторъ надѣется посвятить въ недалекомъ будущемъ свою слѣдующую статью. По той же причинѣ онъ не касается и коммутаций мотора.

Вс. Хрущовъ.

Томскъ,
декабрь 1911 года.

ЗАМѢЧЕННЫЯ ОПЕЧАТКИ.

Страница.	Строка.	Напечатано.	Должно быть.
3	9 сверху	$w_2 = \frac{N_1}{2}$	$w_1 = \frac{N_1}{2}$
17	13 „	$Z_{v=0} = -\frac{c_2}{c_1} x_3$	$Z_{v=\infty} = -\frac{c_2}{c_1} x_3$
21	12 „	$n \Omega$ въ 1 см	$n \bar{\sigma}$ въ 1 см
40	8 снизу	$+ x_I x_{III}$	$+ x_I x_{III}^2$

На рис. 27 т. IV $\cos \varphi_1$ при $\lambda=0$ долженъ имѣть значеніе $=0,3$, а при $\lambda=90^\circ=0,09$.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

	стр.
1. Введеніе	1
2. Діаграмма напругеній	6
3. Коэффициентъ трансформаци	8
4. Электродвижушія силы и реакціи катушекъ мотора	10
5. Дѣйствующее сопротивление, дѣйствующая реакція цѣпи ротора и функціо- нальная связь между ними	15
6. Построеніе круговой діаграммы путемъ послѣдовательныхъ обращеній . .	19
7. Намагничивающій и вторичный токи въ круговой діаграммѣ	28
8. Скорость, сдвигъ фазъ и моментъ въ круговой діаграммѣ	31
9. Потери, мощность и коэффициентъ полезнаго дѣйствія въ круговой діаграммѣ	34
10. Непосредственное построеніе круговой діаграммы	38
11. Первичный, вторичный и намагничивающій токи мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ	41
12. Вращающій моментъ мотора и вліяніе на него постоянныхъ	44
13. Первичная и вторичная мощности мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ	48
14. Коэффициенты мощности и полезнаго дѣйствія мотора и вліяніе на нихъ постоянныхъ	50

Кто знает В.М. Курмуова, Теория регуляционных моторов?

Табл. III.

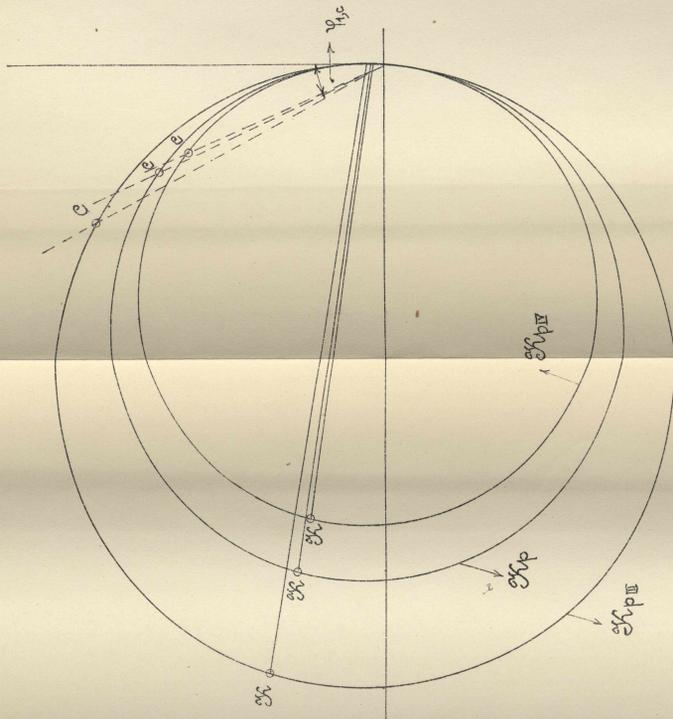


Рис. 21. Уменьшение круговой диаграммы с изменением регуляционных параметров.

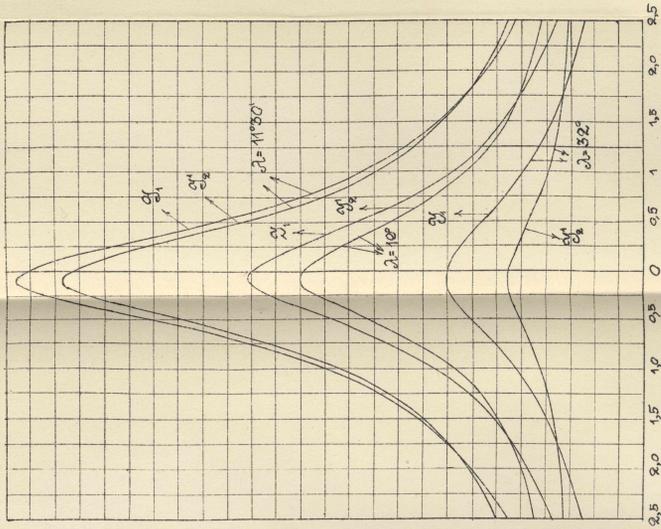


Рис. 22. Первичный (1) и вторичный (2) моменты в зависимости от скорости и при угловых сдвигах $\lambda=19^\circ$ и $\lambda=32^\circ$.

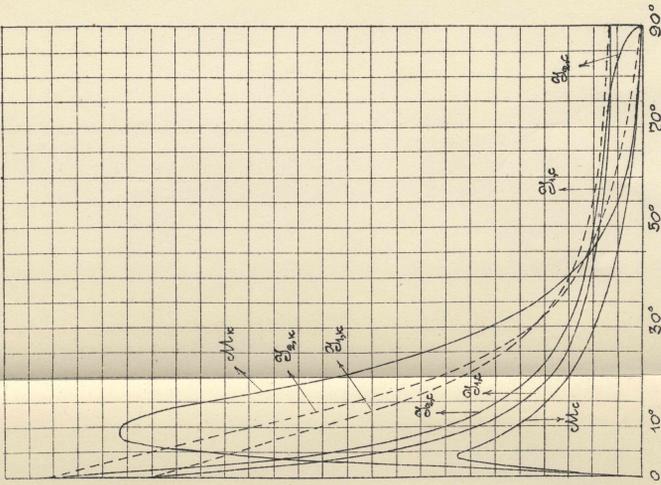


Рис. 23. Первичный момент α_{pI} и вторичный момент α_{pII} и α_{pIII} и α_{pIV} в зависимости от угла сдвига λ .

Углы отапора В.М. Спрунцова: Теория бензодвигательных моторов?

Табл. IV.

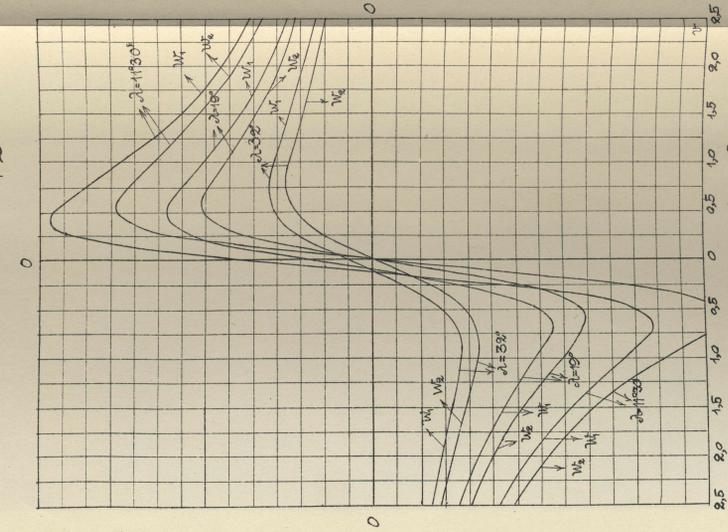


Рис. 26. Эффективная (N) и вращательная (η) мощности в зависимости от угла отапора и при углах отапора $\alpha_1=130^\circ, \alpha_2=108^\circ, \alpha_3=83^\circ, \alpha_4=59^\circ$.

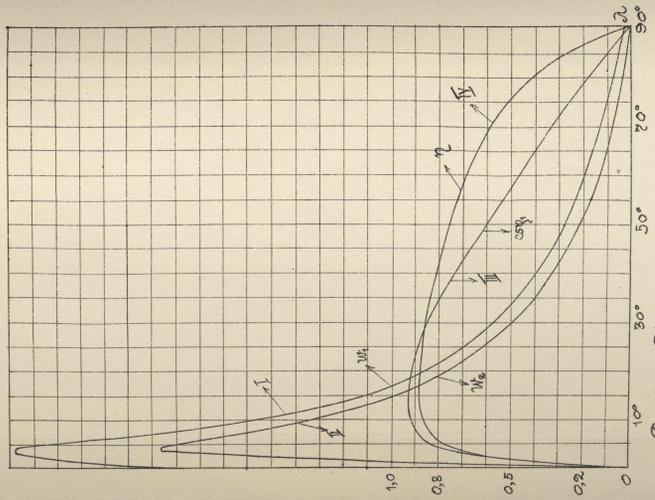


Рис. 27. Эффективная мощность (N), вращательная мощность (η), коэффициент полезного действия (η) и коэффициент полезного действия (η) в зависимости от угла отапора.

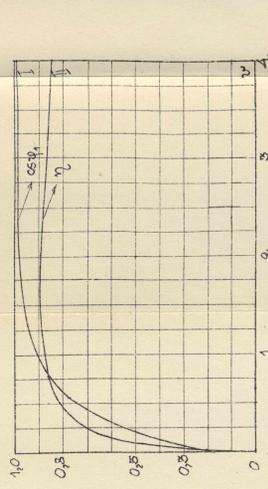


Рис. 28. Коэффициент полезного действия (η) и коэффициент полезного действия (η) в зависимости от скорости.

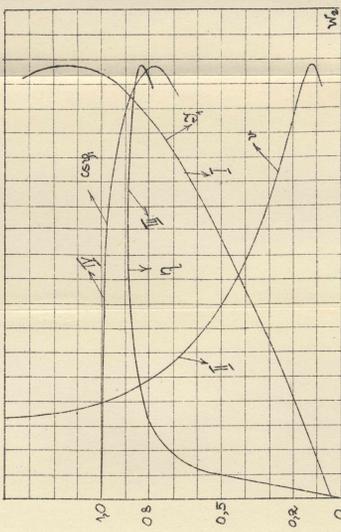


Рис. 29. Эффективный момент (M), скорость (v), коэффициент полезного действия (η) и коэффициент полезного действия (η) в зависимости от угла отапора.

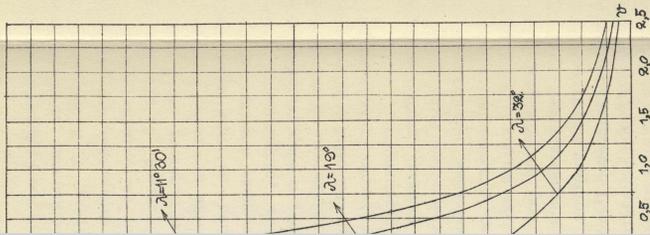


Рис. 30. Эффективный момент (M) и вращательная (η) мощность в зависимости от угла отапора и при углах отапора $\alpha_1=30^\circ, \alpha_2=10^\circ, \alpha_3=52^\circ$.