

## **Параметры явления скоса пазов АД со скошенными пазами**

*Vedam Subrahmanyam, член IEEE*

Перевод: Аллагулова Е.В.

*Реферат.* Скос пазов ротора, для устранения вредных влияний временных гармоник, приводит к неоднородному распределению плотности потока вдоль вала. Это ослабляет связь между мдс статора и ротора, внося дополнительное рассеивание в места скоса пазов. Три различных эквивалентных цепи, являющихся производными от первой принципиальной, необходимы для рассмотрения реактивного сопротивления потока рассеяния в месте скоса как параметра. Сокращение связи между гармониками мдс приводит к увеличению амплитуды гармоник рассеяния. Обоснованная модификация существующего метода предлагает оценить реактивное сопротивление потока рассеяния при условии насыщения для асинхронного двигателя со скошенными пазами ротора.

*Основные термины.* Эквивалентные цепи машин со скошенными пазами ротора, явление насыщения, явление скоса пазов, реактивное сопротивление потока рассеяния скошенных пазов.

### **I. Введение**

Малые и средние асинхронные двигатели с беличьей клеткой нормально спроектированы со скосом пазов ротора главным образом для того чтобы минимизировать моменты скольжения и зубцовый в результате пазовых гармоник, которые не могут быть устранены распределением обмоток и коротким замыканием. Скос пазов в свою очередь сокращает магнитную связь между мдс статора и ротора в результате чего появляются дополнительные поля рассеяния в двигателе. Скос пазов также вызывает не однородное распределение потока по воздушному зазору вдоль вала. Это распределение модифицировано насыщением магнитной цепи, также как и осевые потоки, которые существуют в периферии воздушных зазоров вдоль вала. Знание не однородного распределения должно быть существенным для полного понимания всех потоков, зависящих от тех или иных явлений имеющих место в машине.

Дополнительный поток рассеяния и связанное с этим реактивное сопротивление рассеяния должны быть приняты во внимание в эквивалентной цепи как параметр в систематическом методе, таким образом, что исполнение двигателя со скошенными пазами может быть наперед задано на этапе проектирования.

На основе не однородного распределения мдс вдоль вала возможно применение нескольких методов, для оценки реактивного сопротивления рассеяния скоса пазов, учитывающие поток рассеяния насыщения изменения в двигателе [3], [4]. Согласно расширенным методам Agarwal и Alger [5] для асинхронных двигателей со скошенными пазами ротора. Настоящий метод рассматривает все компоненты потока рассеяния, которые принимаются для насыщенного потока рассеяния. Тем не менее явлением насыщения основного магнитного потока вдоль вала пренебрегаем в их анализе. Кроме того произвольное регистрирование плотности насыщенного потока для идеализированной кривой намагничивания затем приводит к недооценке.

Литература приводит несколько альтернативных эквивалентных цепей для учета реактивного сопротивления потока рассеяния скоса пазов. Butler и Birch [6] основывались на теории сдвоенных цепей, обсужденной в деталях достоверности и практической выгоды альтернативных методов, возможных для учета явления скоса пазов при изменении параметров эквивалентной цепи. Явление скоса пазов в зависимости от параметров эквивалентной цепи может быть выведено из основных принципов определяя коэффициенты трансформации с целью отнести ток ротора на цепь статора [4].

Целями настоящей статьи являются:

1. Определить и изучить не однородное распределение плотности потока вдоль вала.
2. В свете вышеуказанного, привести в надлежащее представление реактивное сопротивление потока рассеяния от скоса пазов в эквивалентной цепи.
3. Рассмотреть явление насыщения реактивного сопротивления потока рассеяния включая реактивное сопротивление потока рассеяния от скоса пазов и предложить подходящий метод для

определения насыщенного реактивного сопротивления потока рассеяния двигателя как функцию напряжения от полной нагрузки.

## II. ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКАВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ВДОЛЬ ВАЛА.

В АД со скошенными пазми ротора результирующая мдс воздушного зазора является функцией от осевой длины вследствие различия мдс статора и ротора различных фаз (рис. 1) вдоль вала. Исполнение магнитной цепи изменяется вдоль длины вала, как же как происходит изменение в относительном положении зубцов статора и ротора. Как обе мдс так и изменения магнитной проводимости являются причиной продольных изменений распределения плотности потока в воздушном зазоре. Распределение плотности потока воздействует в большой степени на насыщение магнитной цепи. Также осевой поток введен периферийным компонентом распределение тока вала. Тем не менее было установлено, что изменения магнитной проводимости вдоль оси и осевого потока относится к выше упомянутому незначительному явлению распределения потока вдоль вала. Мдс воздушного зазора является результирующей мдс статора и ротора. В асинхронном двигателе со скошенными пазми ротора мдс воздушный зазора от отклонения положения оси  $x$  от центра вала может быть записано как

$$A_r(x) = A_{1r} + A_{2r(x)} [e^{i\pi x/l}] \quad 0 \leq x \leq L/2 \quad (1)$$

Мдс статора

$$A_{1r} = \sqrt{2} I_1 \frac{m_1}{\pi} \frac{1}{r} \frac{T_{ph}}{p} k_{dpr} \quad (2)$$

Мдс ротора  $i^{th}$  гармоники индуцированная в роторе  $r^{th}$  гармоникой статора

$$i = \frac{N_2}{p} K_2 + r \quad K_2 = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

$$A_{2r(x)} = \frac{N_2}{p} \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{2} I_1}{2}$$

и соответствующая плотность магнитного потока в воздушном зазоре

$$B_{r(x)} = \frac{\mu_0}{g} A_{r(x)} \quad (4)$$

магнитный поток на полюс становится равным

$$\phi_{r(x)} = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{y=0}^r B_{r(x)} \sin \frac{r\pi}{p} y dy dx \quad (5)$$

подставляя выражение для  $B$  и интегрируя его получим

$$\phi_{r(x)} = \frac{2\sqrt{2}\mu_0}{\pi} \frac{L}{rg} \frac{m_1}{r} \frac{T_{ph}}{rp} k_{dpr} \left[ I_1 + \frac{N_2 K_{dr}}{2m_1 T_{ph} k_{dpr}} I_{2r} \right] \quad (6)$$

Поток вдоль вала может быть определён, используя выше приведенное уравнение.

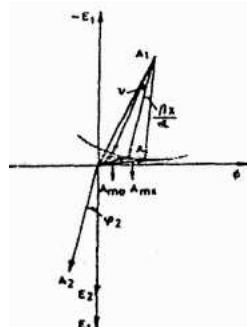


Рисунок 1. – Векторная диаграмма показывающая различия мдс при отклонении положения оси  $x$  от центра вала

Кроме того также возможно получить равнодействующую мдс распределения вдоль вала, используя векторные диаграммы мдс статора и ротора в различных осевых позициях. Рис.2 изображает такую векторную диаграмму, что расположение оси x от центра вала. Различие фаз между мдс статора и ротора в зависимости от положения оси x от центра вала

$$\varphi_{12x} = \gamma + \beta x/L \quad (7)$$

где  $\gamma$  - угол между мдс и центром вала и  $\beta$  - угол скоса пазов в электрических градусах. Для вращения в том же направлении скоса, величина  $x$  от наблюдателя принята положительной (Рис. 1). Фактические мдс воздушного зазора

$$A_{mx} = [A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos \varphi_{12x}]^{1/2} \quad (8)$$

Величины первичной  $A_1$ , вторичной  $A_2$  мдс и  $\gamma$  определены из стандартной эквивалентной цепи асинхронного двигателя, допуская что он представляет характеристики машины в центре вала. По кривой намагничивания машины получена соответствующая плотность распределения потока для любого рабочего условия. Изменение плотности потока и мдс воздушного зазора вдоль длины сердечника для заблокированного ротора при условии полной нагрузки двигателя изображены на рис.3

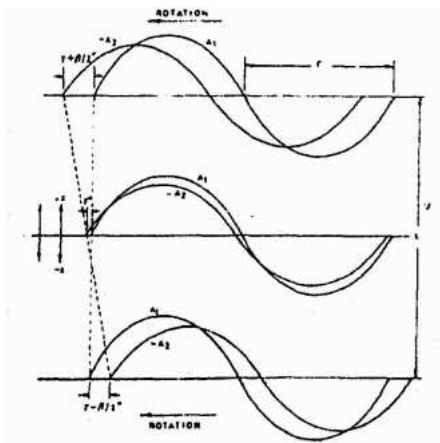


Рисунок 2. - Правило использования для определения знака X измеренного из центра

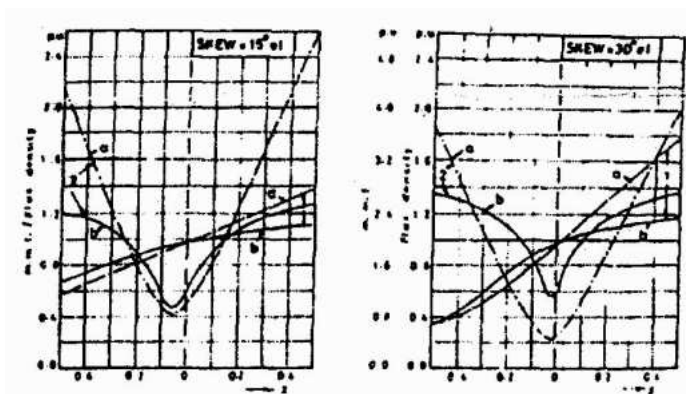


Рисунок 3 – Различия плотности потока вдоль вала

### III. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЦЕПЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СКОШЕННЫМИ ПАЗАМИ РОТОРА.

Используя напряжение и отношения тока цепи статора (6), производные для потока вдоль вала машины индуцированная эдс в статоре соответствующая  $r_{th}$  составляющей гармоники, получена из

$$E_{1r} = -jX_w \left[ I_1 + \frac{N_2 K_{sr} I_{2r}}{2m_1 T_{ph} k_{dpr}} \right] \quad (9)$$

Где  $X_w$  может быть принято в качестве основного реактивного сопротивления статора, найденного по формуле

$$X_w = \frac{4\mu_0}{\pi} m_1 f \frac{T_{ph}^2}{p} \frac{\tau L}{g} \left( \frac{k_{dpr}}{r} \right)^2 \quad (10)$$

Уравнение для напряжения статора может быть записано как

$$V_1 = (R_1 + jX_1) I_1 - \sum_{r=1}^{\infty} E_{1r} \quad (11)$$

Вольт-амперная характеристика цепи ротора, представленная на рис. 4, который показывает разработанный вид ВАХ ротора в зависимости от омического сопротивления и реактивного сопротивления потока рассеяния обмотки ротора сформированной двумя последовательными валами и соответствующими конечными кольцевыми сегментами, приведены соответственно

$$V_{h1} = R_{2r} I_{2r} (2 \sin(rp\alpha_s/2))$$

$$V_{h2} = -jX_{2r} I_{2r} (2 \sin(rp\alpha_s/2)) s_r \text{ where } \alpha_s = \frac{2\pi}{N_2}$$

$$R_{2r} = R_{2br} + 2R_{2rw} (1/(4 \sin^2(\alpha_s p r/2)))$$

$$X_{2r} = X_{2br} + 2X_{2rw} (1/(4 \sin^2(\alpha_s p r/2)))$$

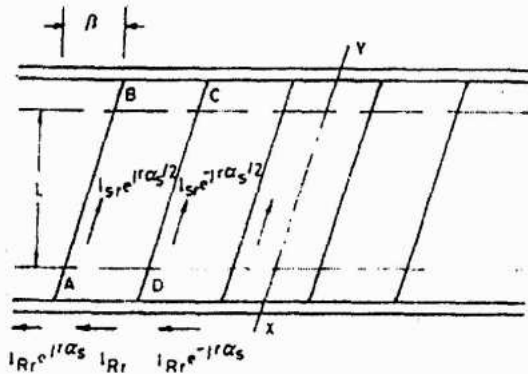


Рисунок 4. – Разработанный вид ротора

### Вывод эквивалентных цепей

В стандартной эквивалентной цепи, реактивное сопротивление дополнительного магнитного потока рассеяния от скоса пазов представлено и в цепи статора и цепи ротора, используя коэффициент трансформации тока

$$a_{sr} = \frac{I'_{2r}}{I_{2r}} = \frac{N_2}{2m_1 T_{ph} k_{dpr}} \quad (13)$$

$v$ -и отношения статора, предполагая, что  $R_2$  и  $x_2$  небольшие по сравнению с  $xh2g$  для частот более высокого порядка гармоник получены как

$$V'_1 = (R_1 + jX_1) I_1 + jI_1 \sum X_w (1 - k_{sr})$$

$$+ jI_1 \sum (X_w (1 - k_{sr} \eta_r^2)) k_{sr} + jX_w k_{sr} (I_1 + I'_2) \quad (14)$$

Аналогичное уравнение для ротора может быть записано как

$$0 = I_2' \left( \frac{R_2'}{s} + jX_{s2r}' \right) + jX_m k_{sk} (I_1 + I_2) + jX_m I_2' \left( \frac{1}{\eta^2} - k_{sk}^2 \right) \quad (15)$$

Эквивалентная цепь показана на рис. 5

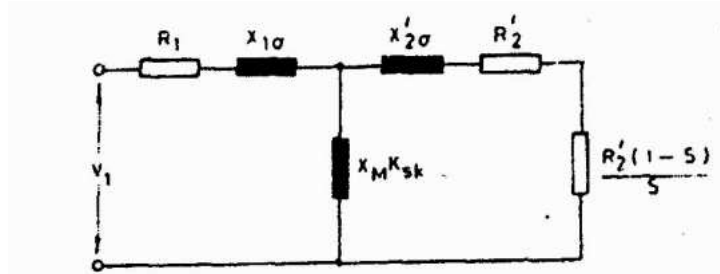


Рисунок 5. Стандартная эквивалентная цепь АД со скошенными пазами ротора.

Упрощенные v-i соотношения:

$$V_1 = I_1 (R_1 + jX_{s1}) - jI_2' X_m + j(I_1 + I_2') X_m + jX_m (I_1 + I_2') + \Delta V_1 + \Delta V_2$$

$$\text{where, } \Delta V_1 = -jI_2' \sum_{r=1}^{\infty} X_{mr} (1 - \eta_r^2 X_r^2)$$

$$\Delta V_2 = j(I_1 + I_2') \sum_{r=1}^{\infty} X_{mr} (1 - \eta_r^2 X_r^2)$$

$$V_2 = 0 = I_2' \left( \frac{R_2'}{s} + jX_{s2r}' \right) + jX_m (I_1 + I_2') \quad (16)$$

Эквивалентная цепь изображена на рис.6

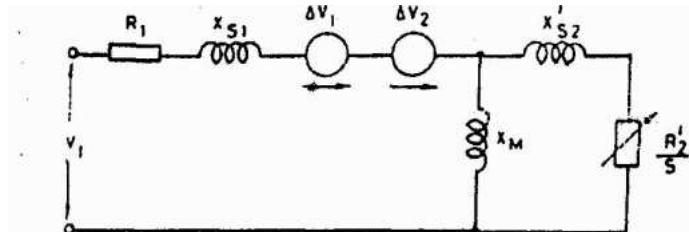


Рисунок. 6 - Эквивалентная цепь АД со скосом пазов ротора, учитывающая явление скоса пазов только в цепи статора.

Эффект скоса пазов введен с точки зрения показателя скоса

$$k_{sk} = \frac{\sin(r\beta/2)}{r\beta/2} \quad (17)$$

Из разработанных эквивалентных цепей ясно, что явление скоса воздействует подобно распределению обмотки поскольку имеется сходство выражений для показателей скоса пазов и распределения обмоток. Последние уравнения также показывают, что скос кроме индуцирования потока рассеяния от скоса пазов, увеличивает гармоники рассеяния двигателя. Скос пазов с другой стороны увеличивает гармоники рассеяния. Это может быть отнесено к основной природе скоса, что это уменьшает связь мдс между статором и ротором. Взаимодействие мдс статора и ротора становится меньшим и как следствие гармоники рассеяния возрастают. Этот эффект более наблюдается со стороны ротора чем на стороне статора. Могут быть увеличены от 10% до 15% гармоники рассеяния, кроме того в машине дополнительный компонент называется реактивным сопротивлением потока рассеяния от скоса пазов.

#### IV. ЯВЛЕНИЕ НАСЫЩЕНИЯ В АСИНХРОННОМ ДВИГВТЕЛЕ СО СКОСОМ ПАЗОВ РОТОРА.

Рассматривая насыщение как общий явление общего потока, показатель насыщения выделяется принимая во внимание общий поток рассеяния в насыщенной части. Общий поток, учитывающий воздушный зазор (рис. 8b)

$$\phi_{x1} = \phi_{rs} + \phi_z + \phi_{\Delta s(x)} \quad (18)$$

Используя давно принятые выражения для  $\phi_{rs}$ , поток рассеяния паза, поток рассеяния скоса и  $\phi_{\Delta s(x)}$ . Таким образом мы имеем

$$\phi_{x1} = \frac{\mu_0 6\sqrt{2} k_{r1} I_1 T_{ph} g}{N_1 3} \left\{ \begin{aligned} & \frac{d_{10}}{w_{10}} + \frac{2d_{11}}{w_{10} + w_{11}} + \frac{i'_{10} a_2 b_1}{8g_r} \\ & + \frac{K_{R2} K_d \rho_1 i'_{20} a_2 b_1}{K_{R1} K_{\phi 2} 8g_r} \\ & + \frac{K_{\phi 1} a_2 i'_{10} k_2}{2.1 g_r k_{r1} L} \sigma_{x(x)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

В этом выражении поток рассеяния от скоса выражен как

$$\phi_{\Delta s(x)} = \nabla A T_{mv} \mu_{10} \left( \frac{l_{10}}{8g_r} \sigma_{x(x)} \right) \quad (20)$$

где,  $\sigma_{x(x)}$  - показатель полезного насыщения в воздушном зазоре. Выражение для  $\phi_{x1}$  (Eq. 19) может быть укорочено как

$$\frac{\phi_{x1}}{k_1} = I_1 \left[ h_1 + h_3 + h_2 \cdot \frac{2x}{L} \cdot \sigma_{x(x)} \right] \quad (21)$$

компоненты могут быть определены из уравнения 19. Ток, при котором начинается насыщение, обозначен  $I_1'$  и определяется как

$$I_1' = \frac{B_s A_{s1}}{K_1 (h_1 + h_3 + h_2 \sigma_{x(x)})} \quad (22)$$

Зная величину  $I_1'$  величина  $X_s$  на диаграмме потоков может быть определена из

$$x_s = \frac{L}{2} \left[ \frac{I_1' (h_1 + h_3 + h_2 \sigma_{x(x)}) - I_1 (h_1 + h_3)}{I_1 h_2 \sigma_{x(x)} (L/2)} \right] \quad (23)$$

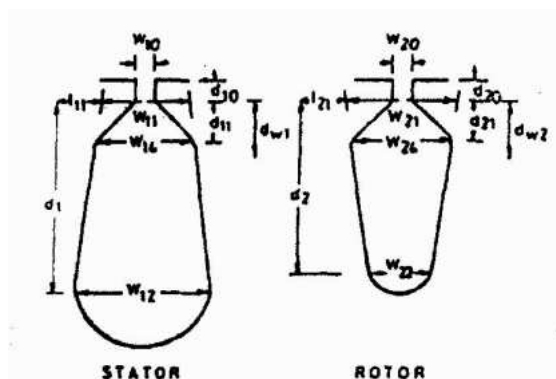


Рисунок. 7 а - Определение размеров пазов

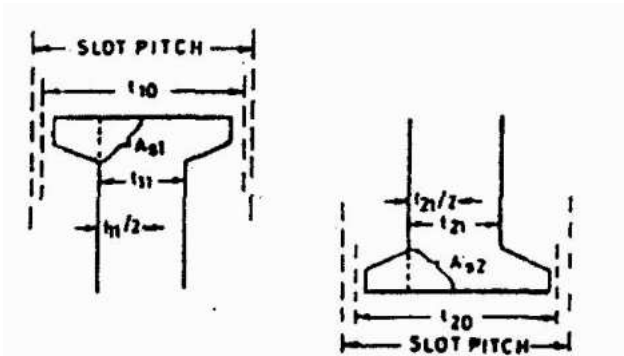


Рисунок. 7 б Области насыщения зубцов статора и ротора.

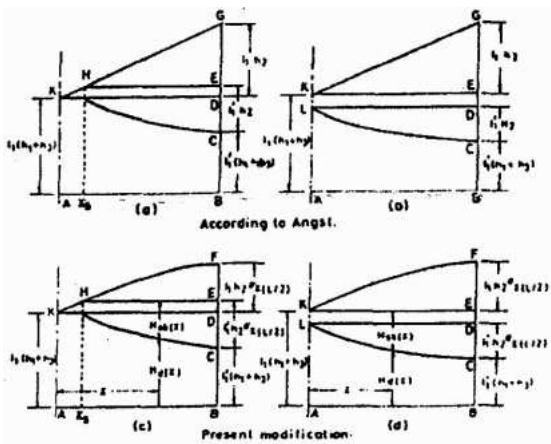


Рисунок 8. - Показатели потока рассеяния

Коэффициент насыщения магнитного потока пазов и зубьев:

$SF$ , = область ABCLK/область ABDK в рис.8с  
 = области ABCL /область ABEK в рис.8d п

Коэффициенты насыщения для реактивностей рассеяния от скоса пазов

$SFA$ , = область KLCDEK /область KDFHK в рис.8с  
 = области области LCD / KEFK. в Fig.8d

Области вычислены используя правила трапеции, показатели насыщения определены и реактивности потока рассеяния вычислены. Аналогичная процедура использована для параметров ротора. Рис. 7а дает рекомендации к измерению формы пазов.

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ.

В качестве тестируемой машины использован 15кВт, трёхфазный, с соединением в треугольник обмоток, на 400В асинхронный двигатель. Два ротора использованы в исследованиях - один ротор, имеющий скос пазов на один шаг (15 электрических градусов) а другой имел скос пазов на два шага (30 электрических градусов). Измерения необходимые для предопределения сделаны в соответствии с техническими требованиями. Ток заторможенного ротора был измерен при различных напряжениях и также предопределён, используя метод Angst [3] и существующую модификацию. Результаты показаны на рисунках 9, 10, 11,12. Рисунки подтверждают, что ток заторможенного ротора соответствующий методу Angst завышается, ошибка больше при больших углах скоса с другой стороны, настоящий метод предопределения величины тока заторможенного ротора, практически совпадает с экспериментальными результатами (Рис. 9). Различные коэффициенты насыщения и реактивные сопротивления рассеяния при насыщении изображены в функции линейного тока как предопределено настоящим методом (Рисунки. 10, 11, 12).

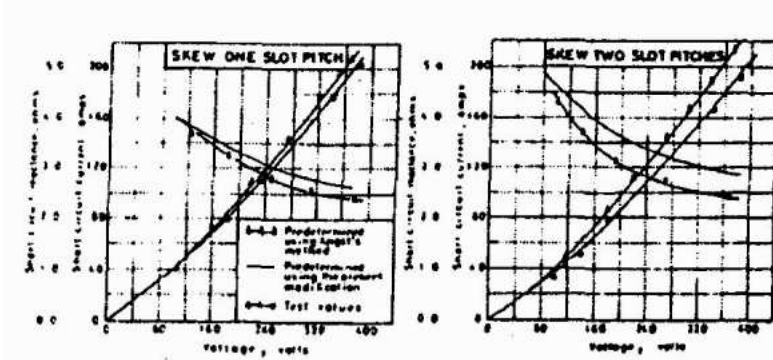


Рисунок 9.- Напряжение в функции тока короткого замыкания и реактивного сопротивления

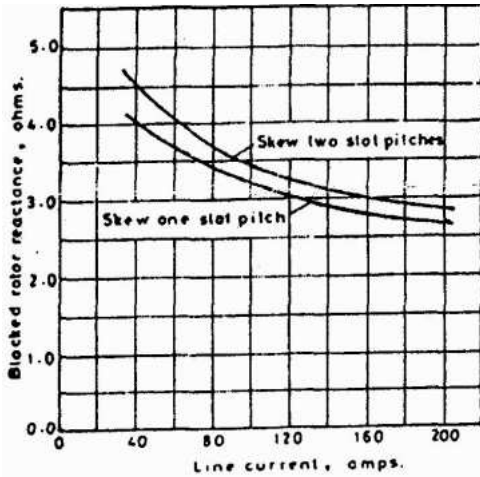


Рисунок 10.- Реактивное сопротивление заторможенного ротора при насыщении в функции напряжения

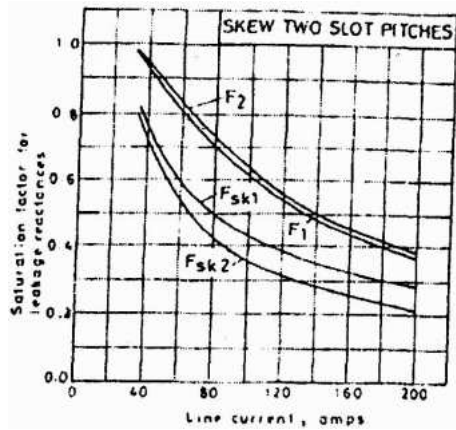


Рисунок 11.- Различные коэффициенты насыщения в функции тока

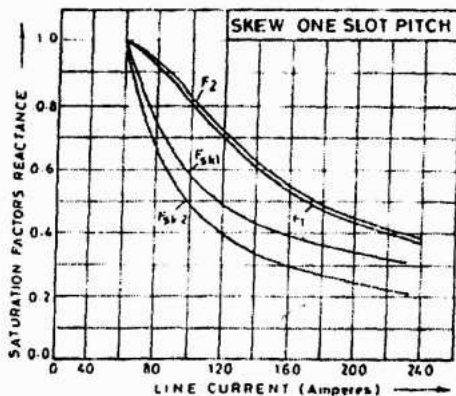


Рисунок 12.- Различные коэффициенты насыщения для реактивности рассеяния в функции тока



## VI. ВЫВОДЫ.

Скос пазов приводит к изменению потока вдоль пакета машины. Поток становится насыщенным при достижении конца пакета. Это изменение может быть предсказано используя векторную диаграмму. Скос значительно сокращает магнитную связь между мдс статора и ротора. Следовательно, индуцируется дополнительный поток рассеяния от скоса. Это увеличивает гармоники рассеяния. Три типа эквивалентной цепи возможны, для того чтобы определить реактивное сопротивление потока рассеяния от скоса пазов при рассмотрении простого изменяя коэффициент трансформации двигателя. Коэффициенты насыщения определены при рассмотрении насыщение как явление общего потока. насыщение основного магнитного потока вдоль пакетов влияет на коэффициент насыщения потока рассеяния от скоса пазов. Метод является общим и может должным образом применяться в программе проектного анализа.