

ОПИСАНИЕ ПОЛЮСНОГО БАШМАКА

электрических машин постоянного и переменного токов для синусоидального распределения магнитного потока на поверхности якоря¹

К патенту П. П. Копияева, заявленному 7 июля 1922 года.

Наиболее рациональной формой кривой электродвижущей силы у альтернатора считается синусоида; при конструировании динамомашин стремятся к тому, чтобы электродвижущая сила альтернатора по крайней мере в разомкнутом состоянии возможно ближе подходила к гармонической кривой. Но форма кривой электродвижущей силы тесно связана с формой кривой магнитного поля машины, а также с формой катушек якорной обмотки. Между тем, кривая поля, при обычном начертании полюсного наколенника близкая к форме прямоугольника, не удовлетворяет этому условию: при простой форме катушек с одним каналом на полюс и фазу и с шириной катушки, равной полюсному делению, кривая электродвижущей силы будет тождественной с кривой поля. Размещение стороны катушки в нескольких каналах, или применение непрерывно распределенной обмотки, уменьшает этот недостаток, сглаживая угловатую форму кривой электродвижущей силы, но никогда не достигается совершенного результата.

Отсюда возникает вопрос о наиболее рациональной форме кривой магнитного поля машины. На первый взгляд, казалось бы, что прямоугольная форма имеет преимущество, так как обнимает наибольшую площадь, то есть дает наибольший поток при данном размере междужелезного промежутка, обеспечивает большую величину электро-

¹ Составлено П. П. Копияевым.

движущей силы и тем позволяет сэкономить на меди. Однако, более глубокое изучение вопроса показывает, что и для поля альтернатора единственно рациональной формой является синусоида. Это заключение выводится непосредственно из разложения кривой поля на гармонические составляющие: всякое отклонение кривой поля от синусоиды выражается прибавкой к основной гармонической кривой целого ряда гармоник высшей периодичности, которые будут индутировать в обмотке статора переменные токи большой частоты. Токи эти, благодаря сильному действию самоиндукции от потока утечки при высокой периодичности, будут отставать от вызвавших их электродвижущих сил почти на четверть своего периода, а от индуцировавших их волн потока будут разниться в фазе примерно на 180° ; этот результат приводит к почти полному аннулированию всех высших гармоник кривой поля. Таким образом, всякая добавка к синусоидальному полю пропадает без пользы для электродвижущей силы машины, напротив, она создает только лишние потери от токов высокой периодичности в обмотке статора. Согласно Арнольду, *полосным наконечникам следует придавать такую форму, чтобы кривая поля возможно ближе примыкала к синусоиде и чтобы верхняя часть кривой не была сглажена.*

Отсюда понятно стремление изменить кривую поля, отклоняя ее от прямоугольной формы в сторону синусоиды. Некоторое улучшение в этом направлении достигается относительным увеличением междужелезного промежутка δ , отчего углы кривой поля скругляются, но это получается ценой повышения возбуждающих ампер-витков. Некоторые фирмы применяют полюсные башмаки со скошенными сторонами (рис. 1), благодаря чему проводники постепенно погружаются в более сильный поток, и результат получается такой, как будто поле своей формой приближалось к трапеции. Ту же цель — приближение кривой поля к синусоиде — Арнольд рекомендует осуществлять особой формой полюсного наконечника (рис. 2): общая ширина его делается равной $0,667$ полюсного деления τ , средняя его часть шириной $0,31 \tau$ очерчивается концентрично со статором, а края скашиваются настолько, чтобы здесь ширина междужелезного промежутка δ_1 составляла около $1,5 \delta$, то есть промежутка в концентричной части. Наконец, полюсный башмак, вместо концентричной дуги на

всей ширине, очерчивается дугой круга — меньшего радиуса (рис. 3). На рис. 1, 2 и 3 для каждой кривой поля помещена основная синусоида, от которой отклонения, как видно ясно, выражаются гармониками 3 и 5 порядков, а также, конечно, и более высокими.

Однако, все здесь указанные и иные применяющиеся в динамостроении средства представляют собой только некоторые улучшения формы кривой поля и, конечно, не в состоянии дать для нее правильную синусоиду.

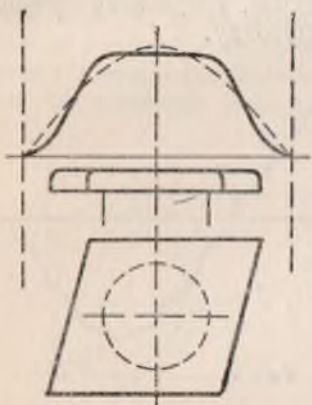


Рис. 1.

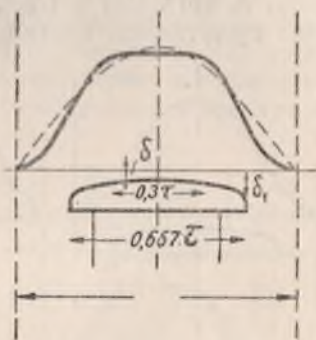


Рис. 2.

Есть еще причина, заставляющая стремиться к получению синусоидальной кривой поля. У тщательно разработанного альтернатора кривая электродвижущей силы все же отклоняется от синусоиды, и эти отступления выражаются в том, что на правильную синусоиду накладываются некоторые волны (фестоны, длина которых совпадает с делением зубца якоря) (рис. 4). Последнее обстоятельство явно указывает, что их происхождение вызвано зубчатой поверхностью якоря, действие которой сводится к следующему. Проводимость трубок индукции по поверхности якоря не одинакова: против зубцов она больше, против пазов значительно ниже; поэтому поток, выходящий из полюса в якорь, будет неодинаков для различных положений зубцов относительно полюса: он будет наибольшим при таком положении, когда сумма ординат кривой поля, взятых против зубцов, окажется наибольшей; наоборот, величина потока примет минимальное значение, когда ука-

занные ординаты против пазов якоря дадут наибольшую сумму. При изменении взаимного положения на величину деления зубца относительное положение зубцов и полюса, а отсюда и величина потока будут повторяться.

Самостоятельные исследования автора в этом направлении привели к следующему выводу: периодических колебаний потока на длине деления зубца вовсе не будет, если изменение суммы ординат кривой поля, взятых против впадин зубчатого якоря, следует синусоидальному закону. А это будет в том лишь случае, когда сама кривая поля представляет правильную синусоиду.

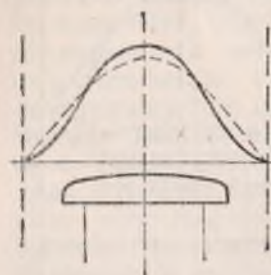


Рис. 3.

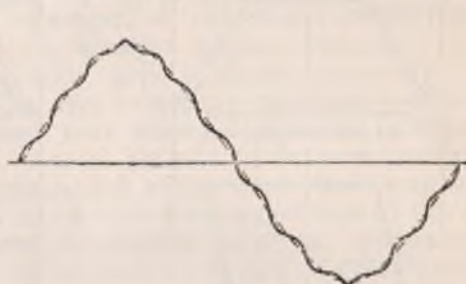


Рис. 4.

Между тем, присутствие на кривой электродвижущей силы высших гармоник от зубцов, помимо лишних затрат на потери в машине, влечет за собой более существенный недостаток, так как эти гармоники при некоторых условиях дают резонанс в линии, соединенный с опасным повышением напряжения. Можно указать еще на одно ценное преимущество синусоидального поля, основанное на свойстве гармонической кривой: сумма (или разность) смещенных синусоид одной продолжительности периода дает всегда синусоиду. Вследствие этого в синусоидальном поле электродвижущая сила будет синусоидой, независимо от того, будут ли применяться катушки с одним или несколькими каналами на полюс и фазу, с распределенной обмоткой или раздельной типа постоянного тока.

Решение вопроса о синусоидальной форме кривой поля основывается на теоретических исследованиях автора, относящихся к 1916 году и позволяющих выяснить форму башмака, который на протяжении всей ширины полюса будет давать для поля точную синусоиду, а за его края

ми — кривую, близкую к синусоиде. Здесь необходимо будет привести основные положения и конечные выводы моей работы.

Распределение поля по поверхности якоря выясняется или путем вычерчивания линий индукции в междужелезном пространстве (способ, не отличающийся точностью), или же вычисляется, как сила взаимодействия между магнитными массами, распределенными по поверхности полюса, а также якоря, и единицей массы в данной точке якорной поверхности; последний способ в обычном своем виде отличается крайней сложностью, требуя решения 15—20 уравнений с предварительным вычислением сотен коэффициентов по сложным формулам. В своей работе я пользуюсь

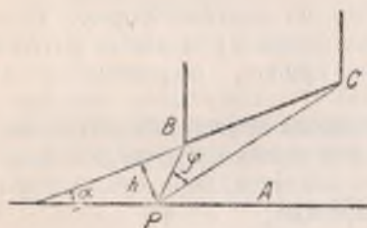


Рис. 5.



Рис. 6.

принципом последнего метода, придавая, однако, его применению и конечным выводам простейшую форму.

Исходным пунктом является следующий вопрос. Дана плоскость A , представляющая развернутую поверхность якоря, и часть BC , принадлежащая поверхности полюсного башмака (рис. 5); для любой точки P поверхности якоря можно говорить об удельной проводимости между поверхностью BC и якорем, разумея под этим отношение проводимости элементарной трубки в выбранной точке к ее сечению или, что одно и то же, проводимость трубки с основанием 1 см^2 в выбранной точке на поверхности якоря. Умножая эту проводимость на магнитодвижущую силу для преодоления междужелезного пространства (величина постоянная, значение ее определяется в конце расчета), мы получим магнитную индукцию в точке P . Если расстояние между BC и якорем мало сравнительно с его длиной (размер, перпендикулярный к плоскости чертежа),

то для удельной проводимости γ , на основании моей работы, получается выражение:

$$\gamma = \frac{\sin \alpha}{\pi x} \cdot \frac{\varphi}{h} \quad (1)$$

Здесь α есть угол наклона BC к якорю, φ угол, под которым из точки P виден отрезок BC (оба угла могут быть выражены в градусах) и h есть высота перпендикуляра, опущенного из P на BC . Найденные отсюда значения γ для ряда точек и дадут кривую поля между полюсом BC и якорем. В частном случае, когда полюс состоит из площадки, параллельной якорю (рис. 6), формула принимает вид:

$$\gamma = \frac{1}{180} \frac{\varphi}{b},$$

и кривая получает указанную на чертеже форму. Если принять во внимание действие соседних полюсов другого наименования, то получится кривая, обозначенная на рис. 6 пунктиром.

Всякий наконечник, очерченный кривой линией, можно разбить на ряд прямолинейных отрезков, и тогда проводимость в любой точке якоря найдется, беря сумму выражений (1) для каждого из отрезков:

$$\gamma = \frac{1}{\pi} \sum \frac{\sin \alpha}{a} \cdot \frac{\varphi}{h}. \quad (2)$$

Сумма берется для всех составных элементов наконечника, из которых поток идет в якорь.

Тот же вопрос для криволинейного наконечника мною решается также аналитическим путем. Если дана кривая MN (рис. 7) полюсного наконечника в форме уравнения $f(x, y) = 0$, то элемент A на его поверхности создаст в точке P в расстоянии ξ от начала проводимость:

$$d\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pi x} \cdot \frac{dx}{y^2 + (x - \xi)^2}. \quad (3)$$

Пользуясь уравнением кривой наконечника, интегрирование выражения (3) определит проводимость для ряда точек якоря и позволит построить кривую поля. На практике приходится ограничиваться лишь такой формой наконечника, когда обращенная к якорю поверхность имеет только небольшой наклон, то есть малый угол α . Исследование показывает, что при такой пологой форме кривой

наконечника, какой бы линией она не очерчивалась, проводимость γ может быть найдена из выражения

$$\gamma = \frac{1}{\pi y} \arctg \frac{by}{y^2 + x^2 - \frac{b^2}{4}}, \quad (4)$$

где b — ширина полюсного наконечника (рис. 7).

Наконец, можно поставить обратную задачу: найти уравнение кривой, по которой должен быть очерчен по-

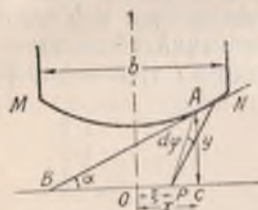


Рис. 7.

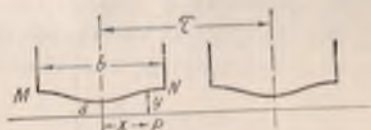


Рис. 8.

люсный наконечник, чтобы он создал для поверхности якоря проводимость по синусоиде. Разработанные автором положения дают для этого уравнения следующий вид:

$$y = \frac{\delta}{\pi \cos \frac{\pi x}{\tau}} \arctg \frac{by}{y^2 + x^2 - \frac{b^2}{4}}. \quad (5)$$

Здесь δ есть теоретическая величина междужелезного пространства по оси полюса, а τ полюсное деление (рис. 8).

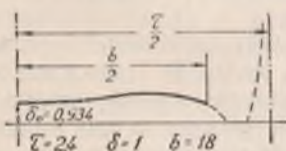


Рис. 9.

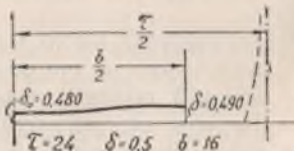


Рис. 10.

Определение из этого уравнения ординаты y , входящей также под знаком арктангенса, может быть произведено способом последовательных приближений. Форма кривой, ограничивающей наконечник, при данном τ будет меняться вместе с шириной полюса b и воздушного промежутка δ . Рис. 9 дает кривую наконечника для $\tau = 24$, $\delta = 1$ и $b = 18$ см; кривая в средней своей части обращена к

якорю своей выпуклостью, а у краев — вогнутостью, давая в промежутке точку перегиба. На рис. 10 представлена кривая для меньшего воздушного промежутка $\delta = 0,5$ и $b = 16$ см; форма ее, сохраняя в общем прежний характер, является менее углубленной. Увеличение ширины полюса при том же значении δ (рис. 11) отодвигает ближе к краю точку перегиба и вместе с тем увеличивает высоту ординаты под краем наконечника. Дальнейшее увеличение ширины b дает на всем протяжении полюса выпуклую кривую (рис. 12). Для заданных τ , δ и b вычисление ординаты y для принятых значений абсциссы x с любой степенью точности производится по уравнению (5).

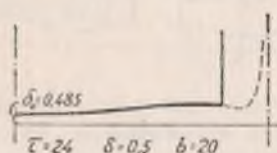


Рис. 11.

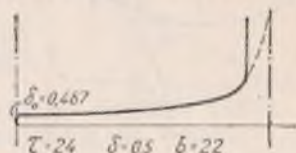


Рис. 12.

При определении таким путем формы кривой полюсного наконечника для проводимости по поверхности якоря или, что одно и то же, для кривой поля получится точная синусоида на всем протяжении ширины b полюса, а также на некотором расстоянии за краем его, и только вблизи нейтральной линии поле незначительно будет отклоняться от синусоиды, образуя здесь несколько более быстрое падение.

Разработанный мною метод дает возможность сгладить и это отклонение от синусоиды, делая на гранях наконечника плоский обрез с некоторой высотой h_1 нормально к поверхности якоря: выходящие отсюда линии индукции будут увеличивать поле за краем наконечника более значительно, нежели сгущать их у края под самым наконечником — последнее же усиление поля может быть учтено расчетом. Кривая на рис. 13 иллюстрирует влияние обреза $h_1 = 2,5$ см для наконечника, изображенного на рис. 10.

Вычерченная по координатам x и y кривая наконечника дает его форму для развернутого в плоскость якоря, а для действительной, то есть цилиндрической поверхности якоря абсцисса x будет представлять расстояние по дуге

круга от оси полюса (рис. 14), ордината же y — ее расстояние от этой дуги по радиусу. Для выяснения ее действительной формы в прямоугольных координатах x' и y' остается сделать переход к ним от координат x и y . Это преобразование для наконечника, изображенного на рис. 13, сделано на рис. 14; вместе с тем здесь произведено закругление кромки наконечника, чтобы избежать некоторого сгущения линий индукции около острого угла.

Для междужелезного пространства δ может быть взята возможно малая величина, допускаемая условиями конструкции. Ширину же полюса можно брать более обычно применяемой с целью получения на возможно большем протяжении строго синусоидального распределения потока.

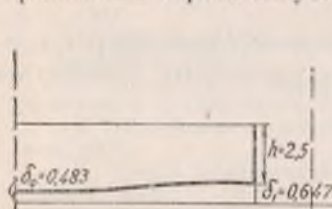


Рис. 13

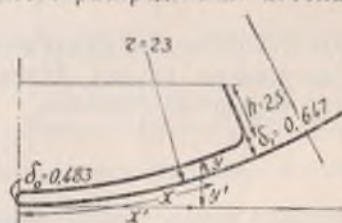


Рис. 14.

Повышающаяся от этого утечка не повлечет за собой увеличения расхода на возбуждение, так как значительная ширина полюса и малая величина δ сильно увеличивают общую проводимость через воздушную щель, отчего расход на возбуждение будет даже понижен. Применение криволинейного башмака с целью получения синусоидального поля не может ограничиться одними машинами переменного тока. При обычной конструкции машин постоянного тока применяется относительно узкая воздушная щель, что обуславливает резко прямоугольный характер поля с сильным ослаблением его у нейтральной линии; этим создаются неблагоприятные условия для коммутирования тока в полосе нейтральной зоны. Применение здесь башмаков с синусоидальным полем повысит его величину в полосе коммутирования и создаст более благоприятные условия для работы без искрения.

Предлагаемый наконечник, осуществляющий синусоидальное поле, может быть очерчен как непрерывной кривой, так и рядом прямолинейных отрезков, близко примыкающих к этой кривой.

Предмет патента.

Полюсный башмак электрических машин постоянного или переменного тока для синусоидального распределения магнитного потока по поверхности якоря, характеризующийся таким очертанием поверхности башмака, обращенной к якорю, при котором длина междужелезного промежутка y (фиг. 14) в какой-либо точке, находящейся на расстоянии x от середины башмака с полюсной дугой, равною b , и полюсным шагом, равным τ , определяется формулой

$$y = \frac{\delta}{\pi \cos \frac{\pi x}{\tau}} \arctg \frac{by}{y^2 + x^2 - \frac{b^2}{4}};$$

где δ — расчетная длина междужелезного промежутка, приблизительно равная длине междужелезного промежутка под серединою башмака.

БИБЛИОГРАФИЯ ТРУДОВ П. П. КОПНЯЕВА

1. Аналогия между явлениями электричества и гидравлики. Журнал «Электричество», № 11—12, 1898.
2. Графический способ определения отдачи двигателя и генератора. Журнал «Электричество», № 23—24, 1898.
3. Курс электротехники. Типография А. И. Степанова, Харьков, 1900.
4. Электротехника, часть 1 и 2. Харьков, типолитография С. Иванченко, 1902.
5. Расчет сетей электрической канализации. Харьков, типолитография С. Иванченко, 1903.
6. Электрические измерения. Лекции. Издание ХТИ, Харьков, 1903.
7. Начала электротехники. Харьков, типолитография М. Зильберберг, 1904.
8. Электротехника. Расчет сетей. Харьков, издание ХТИ, 1904.
9. Динамомашинны постоянного тока. Их теория, испытание, конструкция и расчет (с отдельным атласом чертежей). Типография Дарре, Харьков, 1904.
10. То же в «Известиях Харьковского технологического института», т. I. Харьков, типография и литография М. Зильберберг, 1905.
11. Доклад на IV Всероссийском электротехническом съезде. Труды IV съезда, том II — Об организации Южно-русской электротехнической выставки. Киев, 1907.
12. Курс электротехники, читанный в ХТИ. Переменный ток. Составлен по лекциям проф. Копняева П. П. в 1909 году. Издание ХТИ, Харьков.
13. Переменный ток. Технологический институт. Издание Технического студенческого общества, Харьков, 1909.
14. Предисловие к переводу на русский язык книги Густава Лабона «Возникновение и исчезновение материи». Харьков, типография Дарре, 1909.
15. Электрические измерения. Пособие для занятий в лаборатории. Типография и литография М. Зильберберг, Харьков, 1910.
16. Курс электротехники, часть IV. Электрические установки. «Известия Харьковского технологического института», том VII. Типография и литография М. Зильберберг, Харьков, 1911.
17. То же отдельно: Курс электротехники, часть IV. Электрические установки. Типография и литография М. Зильберберг, Харьков, 1912.
18. Курс электротехники, т. I. Основы электричества и магнетизма. «Известия Харьковского технологического института», т. VIII. Типография и литография М. Зильберберг, Харьков, 1912.

19. То же отдельно: Курс электротехники, т. I. Основы электричества и магнетизма. Типография и литография М. Зильберберг, Харьков, 1913.

20. Графический расчет трамвайной тяги. Журнал «Электричество», № 2, 1914.

21. Аналитический расчет трамвайной тяги. Журнал «Электричество», № 2, 1915.

22. Дополнение к курсу измерительных приборов. Издание ХТИ, Харьков, 1915.

23. Дополнения к переменному току. Издание ХТИ, Харьков, 1916.

24. Начальный курс электротехники. Пособие для слушателей рабочих курсов. Державне видавництво України, Харків, 1922.

25. Динамомашинны постоянного тока. Издание ХТИ, Харьков, 1924.

26. Динамомашинны переменного тока. Издание ХТИ, Харьков, 1925.

27. Основы электротехники. Конспект по переменному току. Издание ХТИ, Харьков, 1926.

28. Основы электротехники, выпуск II. Символический метод. Издание Харьковского технологического института, производственная часть, Харьков, 1926.

29. Электрические машины постоянного тока. Государственное издательство Украины, Харьков, 1926.

30. К истории электротехнического факультета ХТИ. Журнал «Электротехнический вестник», № 1, 1926.

31. Электрические машины переменного тока. Издание ХТИ, Харьков, 1927.

32. Основы электротехники, часть II. Конспект по переменному току. Издание ХТИ, Харьков, 1927.

33. Электрические измерения. Издание производственной части ХТИ, Харьков, 1928.

34. Доклад на I Всеукраинском энергетическом съезде. «К сооружению электротехнических лабораторий ХТИ». Труды съезда, выпуск II. Харьков, 1928.

35. Основы электротехники, часть II. Переменный ток. Издание ХЭТИ, Харьков, 1930.

36. Основы электротехники, том IV. Реактивные катушки и трансформаторы. Издание ХЭТИ, Харьков, 1930.

37. Основы электротехники, часть I. Коло простого струму. ДВОУ, Технічне видавництво, Харків, 1931.

38. Электрические машины переменного тока. Издание ХЭТИ, Харьков, 1933.

ЛИТЕРАТУРА О П. П. КОПНЯЕВЕ

1. Научно-педагогическая деятельность Павла Петровича Копняева.

Журнал «Электротехнический вестник», № 1, 1926. ✓

2. Профессор Павел Петрович Копняев (к 25-летию научно-учебной деятельности).

Журнал «Электротехнический вестник», № 1, 1926. ✓

3. В. О. Каменева. «Видатний російський вчений П. П. Копняев».

Вісник Академії Наук УРСР, № 9, 1953. ✓

4. А. Я. Бергер, М. О. Каменецкий. «Роль П. П. Копняева в деятельности русской электротехнической школы».

Журнал «Электричество», № 1, 1954. ✓

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
От редколлегии	3
Статьи о творчестве и деятельности П. П. Копняева	
В. А. Каменева. Значение деятельности П. П. Копняева в развитии отечественной электротехники	7
И. М. Постников. О векторных диаграммах синхронной явнополюсной машины	41
И. М. Ковтун. О работах профессора П. П. Копняева в области электрических машин постоянного тока	48
М. М. Таращанский. Труды заслуженного профессора П. П. Копняева по электрическим машинам переменного тока	64
О. Б. Брон. Павел Петрович Копняев — ученый, организа- тор, педагог. (Воспоминания ученика)	77
А. Я. Бергер. Об одной книге П. П. Копняева	87
Неопубликованные работы П. П. Копняева	
Векторная диаграмма альтернатора	93
Описание полюсного башмака электрических машин постоянного и переменного токов для синусоидального распределения магнитного потока на поверхности якоря	121
Библиография трудов П. П. Копняева	131
Литература о П. П. Копняеве	133