

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ГОРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А. А. ЖДАНОВА

Инж. Н. А. ГАЛОЧКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ И РЕЖИМОВ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ УТРОИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ
С ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Горький — 1961 г.

В диссертации рассмотрен ряд явлений и свойств утроителей частоты с емкостной компенсацией. Установлены условия эквивалентности наиболее распространенных схем утроителей частоты с трехфазным питанием, а также критерии подобия режимов и свойств, позволяющие воспроизвести их на моделях. На основе теории нелинейных колебаний и решения нелинейного дифференциального уравнения колебаний гармоник нулевой последовательности индукции исследованы вопросы устойчивости амплитуды третьей гармоники, явления автоколебаний, посторонних гармоник, определены границы существования областей этих явлений через параметры схем и конструкций. На основе экспериментальных данных и аналитического решения дифференциального уравнения колебаний рассмотрены вопросы выбора обобщенных параметров утроителей из условий затрат материалов и исключения нежелательных режимов.

Работа выполнена в Ивановском энергетическом институте имени В. И. Ленина в 1960 году.

195773.

Центральная научная
библиотека
Академии наук Киргизской ССР

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшая электрификация народного хозяйства нашей страны наряду с огромным количественным ростом предполагает также и глубокие качественные изменения в области производства и потребления электроэнергии.

В промышленности все большее применение находят приемники повышенных и высоких частот, позволяющие повысить производительность труда и улучшить или даже коренным образом перестроить технологию отдельных процессов.

Частоты порядка 100—150 герц уже широко применяются для питания переносного электроинструмента при строительномонтажных работах, для электросварки, индукционного нагрева металлов, для привода центрифуг и сепараторов, в прядении искусственного волокна и т. д. Наконец, повышенные частоты применяются в разного рода устройствах автоматики, телеуправления, измерений и т. п.

В дальнейшем применение повышенных частот в промышленности будет все возрастать.

Встает серьезная проблема получения повышенных частот от источников электроэнергии промышленной частоты, поскольку машинные преобразователи, в основном применяемые сейчас, в ряде случаев оказываются мало пригодными для этих целей.

Статические ферромагнитные преобразователи частоты, изменяющие ее в небольшое число раз, имеют хорошие технико-экономические показатели и потому во многих случаях могут выполнять роль генераторов повышенных частот лучше, чем машинные.

Принципы преобразования частоты с помощью ферромагнитных трансформаторов известны уже около полувека. С тех пор не прекращалась работа по их совершенствованию и применению, в чем принимали большое участие и советские ученые (В. П. Вологдин, М. А. Спицын, Н. Н. Рукавишников, Н. П. Ермолин и др.).

В послевоенные годы интерес к ферромагнитным преобразователям частоты значительно возрос. В этой области появились и стали широко известными работы Г. Н. Петрова, А. Д. Кратирова, А. М. Бамдаса, Л. А. Бессонова, М. С. Михайлова-Микулинского, Л. Л. Рожанского, А. И. Зайцева, И. А. Зайцева, К. Г. Митюшкина, С. В. Шапиро, Я. В. Петрова и других. Значительное число работ опубликовано и в зарубежной печати, из которых необходимо отметить работы Блейка, Бирингера, Джонсона, Рауха и др.

В деле практического применения ферромагнитных преобразователей частоты в промышленности и в создании конструкций и инженерных методов их расчета большую работу провела исследовательская лаборатория кафедры электрических машин и аппаратов Горьковского политехнического института под руководством доктора технических наук профессора А. М. Бамдаса.

Реферируемая работа посвящена исследованию некоторых режимов и свойств ферромагнитных устройств частоты с трехфазным питанием, которые имеют наивысшие технико-экономические показатели по сравнению с преобразователями частоты других кратностей, наиболее просты и поэтому находят себе наибольшее применение. Кроме того частота 150 герц близка к стандартной частоте 200 герц. Поэтому ряд приемников 200 герц, в частности, различного рода электроинструмент, может с успехом питаться от устройств частоты, что показал опыт их применения в монтажной практике.

Так как утроители частоты без емкостной компенсации достаточно хорошо изучены и в настоящее время в практике редко применяются, то отпадает необходимость в их дополнительном подробном изучении.

В современных конструкциях утроителей частоты, как правило, применяется емкостная компенсация вторичной цепи, которая резко интенсифицирует процесс преобразования, но вместе с тем значительно усложняет картину явлений в утроителях. Нами подробно рассматриваются именно те явления,

которые связаны с включением емкости во вторичную цепь и которые еще недостаточно теоретически изучены.

В отличие от известных методов, нами в основу исследования положено рассмотрение нелинейного дифференциального уравнения колебаний гармоник нулевой последовательности индукции сердечников и его аналитическое решение. Это дало возможность определить характер и области существования таких обнаруживаемых экспериментально явлений, как автоколебания в утроителях, неоднозначность амплитуды третьей гармоники, посторонние гармоники во вторичной э. д. с.

На основе экспериментальных данных и анализа решения выявлено влияние коэффициентов дифференциального уравнения колебаний на технико-экономические показатели утроителей и рассмотрены вопросы подобия при моделировании утроителей по этим коэффициентам.

В результате общего анализа даны рекомендации по выбору основных параметров, удовлетворяющих условиям устойчивости и экономичности.

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ УТРОИТЕЛЕЙ

К настоящему времени разработан целый ряд типов и конструкций утроителей частоты с трехфазным питанием, которые отличаются схемами обмоток и способами включения нагрузок и компенсирующих конденсаторов, что определяет их различные эксплуатационные свойства (магнитопровод, как правило, составляется из однофазных сердечников).

Однако, поскольку процесс преобразования энергии происходит в ферромагнитном веществе утроителей и энергетика этого процесса зависит от состояния ферромагнитного вещества, то воспроизведя это состояние, мы в любой конструкции можем получить один и тот же эффект или явление.

Известно, что магнитное состояние определяется амплитудами и фазами гармоник индукции и напряженности магнитного поля сердечников. Если выполнены условия равенства этих параметров состояния в ряде утроителей, то с точки зрения явлений в ферромагнитном веществе и его внешних проявлений такие утроители можем считать эквивалентными. Таким образом, условиями эквивалентности состояний утроителей, являются следующие:

$$B_{n1} = B_{n2} \quad \text{амплитуды гармоник индукции} \quad (1)$$

$$\psi_{n1} = \psi_{n2} \quad \text{фазы гармоник индукций} \quad (2)$$

$$H_{n1} = H_{n2} \text{ амплитуды гармоник напряженности } (3)$$

$$\varphi_{n1} = \varphi_{n2} \text{ фазы гармоник напряженности } (4)$$

Исходя из высказанных выше положений следует, что изучение свойств и явлений в утроителях как аналитически, так и экспериментально можно производить на какой-то одной схеме и конструкции утроителя и нагрузки.

Нами в качестве такой схемы и конструкции принят утроитель Спинелли с нагрузкой в виде параллельно включенных емкости и активного сопротивления. Принятая схема и конструкция называется расчетной. Она позволяет воспроизвести состояния утроителей при всех наиболее распространенных нагрузках (активно-емкостной, активной при емкостной компенсации и активно-индуктивной при емкостной перекомпенсации) во всевозможных их комбинациях. Очевидно, что ряд схем. утроителей может по разному отзываться на изменение одноименных параметров. Однако, во всей серии состояний расчетной схемы всегда найдется такое, которое соответствует данному конкретному случаю.

Для того, чтобы можно было воспользоваться данными, полученными в результате изучения расчетной схемы или воспроизвести интересное явление в другой конкретной конструкции утроителя, в работе были получены формулы пересчета параметров наиболее распространенных схем утроителей к параметрам расчетной схемы. При этом были использованы условия (1) — (4) при допущениях, что активные и индуктивные сопротивления обмоток, а также рассеяние магнитопровода отсутствуют.

Нагрузки при пересчете в ряде случаев могут быть эквивалентны только по одной какой-то частоте, что учитывается, когда изучаются явления, связанные с посторонними гармониками, например, автоколебания.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ. ПОДОБИЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

При составлении дифференциального уравнения расчетной схемы для упрощения анализа принято, что потери в стали и меди обмоток, а также рассеяние отсутствуют, а линейные напряжения питающей сети синусоидальны.

Аналитическое выражение кривой намагничивания принимается в виде кубической параболы:

$$\frac{AW}{см} = \alpha B + \beta B^3 \quad (5)$$

Для уточнения некоторых данных используется также выражение:

$$\frac{AW}{см} = \alpha B - \beta B^3 + \delta B^5 \quad (6)$$

Поскольку напряжение вторичной цепи в утроителях определяют те гармоники индукции, которые образуют систему нулевой последовательности, то и дифференциальное уравнение составляется относительно этих гармоник. В качестве неизвестной вводится величина x , определяемая как мгновенное относительное значение гармоники по выражению:

$$x = \frac{b_0(t)}{B_{1m}} \quad (7)$$

где B_{1m} — амплитуда первой гармоники индукции в сердечниках.

Введя безразмерное время и воспользовавшись известными соотношениями в утроителе Спинелли, с принятой нагрузкой, и формулой (5), получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{RC\omega_1} \frac{dx}{dt} + \frac{110^8 \left(\alpha + \frac{3}{2} \beta B_{1m}^2 \right)}{3\omega_2^2 SC\omega_1^2} x + \frac{110^8 \beta B_{1m}^2}{3\omega_2^2 SC\omega_1^2} x^3 + \frac{110^8 \beta B_{1m}^2}{12\omega_2^2 SC\omega_1^2} \cos 3t = 0 \quad (8)$$

где R, C, ω_1 — активная нагрузка в омах, емкость в фарадах и угловая частота питающей сети;

α, β — коэффициенты кривой намагничивания;

l, S — средняя длина магнитной силовой линии в см и сечение магнитопровода в см²;

B_{1m} — амплитуда первой гармоники индукции в гаусах;

ω_2 — число витков вторичной обмотки;

$t = \omega_1 t'$ — безразмерное время.

В случае аппроксимации кривой намагничивания в виде параболы пятой степени (ф-ла 6) сохраняется порядок дифференциального уравнения, величина коэффициента при первой производной, характер нелинейности и гармонический состав возмущающей силы. Очевидно, что и характер полученного решения будет такой же, как и в случае более простой формулы. Поэтому для анализа правомерно использование

дифференциального уравнения, полученного на основе простой формулы кривой намагничивания (ф-ла 5).

Уравнение (8) в безразмерной форме имеет следующий вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2H \frac{dx}{dt} + k^2x + \gamma x^3 + a \cos 3t = 0 \quad (9),$$

где

$$2H = \frac{1}{RC\omega_1}; \quad k^2 = \frac{l10^8}{3\omega_2^2 SC\omega_1^2} \left(\alpha + \frac{3}{2}\beta B_{1m}^2 \right);$$

$$a = \frac{\gamma}{4} = \frac{l10^8\beta B_{1m}^2}{12\omega_2^2 SC\omega_1^2} \quad (10)$$

Совершенно очевидно, что решение уравнений (9) зависит только от величин коэффициентов и их соотношения и не зависит от конструктивных или иных данных утроителя. Любые утроители, имеющие одинаковые коэффициенты H , k , a , γ , имеют одно и то же решение для x . Отсюда следует, что утроители можно моделировать. Условиями подобия является равенство коэффициентов дифференциального уравнения. Как будет показано ниже, этих условий достаточно, чтобы определить все другие данные решения.

Из выражений (10) видно, что независимых коэффициентов три: H , k , a . Соотношение между этими коэффициентами в свою очередь зависит от величины амплитуды первой гармоники индукции B_{1m} . Поэтому целесообразно в качестве критериев подобия взять H , k , B_{1m} , которые вполне определяют как величину коэффициентов, так и соотношение между ними, что становится очевидным, если, на основании выражений (10), записать уравнение (9) в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2H \frac{dx}{dt} + k^2x + \frac{k^2}{3\psi(\alpha)} x^3 + \frac{k^2}{12\psi(\alpha)} \cos 3t = 0 \quad (11)$$

где

$$\psi(\alpha) = \left(\frac{\alpha}{3\beta B_{1m}^2} + \frac{1}{2} \right)$$

Из всех трех коэффициентов только значение k определяется через конструктивные элементы утроителя и зависит от принятой для аппроксимации кривой намагничивания формулы. Поэтому условия подобия при моделировании соблюсти не

представляет больших трудностей. При этом необходимо выражение коэффициента k уточнить. Для полной параболы пятой степени k^2 равно:

$$k^2 = \frac{l10^8\delta B_{1m}^4}{\omega_2^2 SC\omega_1^2} \left(\frac{\alpha}{3\delta B_{1m}^4} - \frac{\beta}{2\delta B_{1m}^2} + \frac{5}{8} \right) \quad (12)$$

При тех насыщениях магнитной системы, с которыми обычно работают утроители, решающую роль в изменении всех показателей утроителей играет изменение обобщенных параметров k и H . Изменение же амплитуды первой гармоники индукции влияет на поведение утроителей в значительно меньшей степени, вследствие небольшого изменения коэффициента $\psi(\alpha)$ в зоне насыщения (см. уравнение 11). Это обуславливает также малое влияние коэффициентов формулы кривой намагничивания. Поэтому обобщения, полученные на основе изучения конкретного утроителя, приобретают достаточную общность.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

Для исследования свойств утроителей произведено аналитическое решение дифференциального уравнения (9). Найдено периодическое решение для третьей гармоники индукции в виде рядов из коэффициентов H , k , γ , a . Для анализа и построения решения за независимые параметры приняты те же обобщенные параметры, которые могут служить критериями подобия; H , k и B_{1m} . Коэффициент H (затухание) не связан с конструкцией утроителя и действительно является независимым. Коэффициент k при первой степени x дифференциального уравнения колебаний характеризует степень отклонения параметров утроителя, как колеблющейся системы, от положения главного резонанса (при главном резонансе $k=3$). Его изменение, при заданной конструкции утроителя, означает либо изменение амплитуды первой гармоники индукции, либо емкости, либо изменение того и другого.

Нелинейное уравнение (9) называется уравнением Дуффинга, которое не решается в квадратурах. Его периодическое решение для третьей гармоники индукции получено на основе методов малого параметра И. Г. Малкина, базирующихся на теории Пуанкаре и Ляпунова.

Для решения исходное уравнение (9) преобразовано к разрешимому виду с помощью электрической аналогии. При этом получены два типа уравнений, соответствующие малым и

большим значениям затухания H . Эти уравнения записываются в таком виде:

$$\frac{dx^2}{dt^2} + k^2x + \gamma x^3 = -\mu \left(a \cos 3t + 2H \frac{dx}{dt} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\epsilon \left(\frac{d^2x}{dt^2} + k^2x + \gamma x^3 + a \cos 3t \right); \quad \epsilon = \frac{1}{2H} \quad (14)$$

где μ и ϵ — малые параметры.

При малых H система близка к ляпуновской и описывается уравнением (13). При больших H (уравнение (14)) система является нерезонирующей.

Согласно методу, найдены все решения порождающих уравнений (левых частей уравнений (13) и (14)). Часть этих решений соответствующим образом отобрана в качестве первых приближений решения полных уравнений.

Уравнение (14) имеет порождающее решение, отвечающее физическим условиям задачи вида:

$$x_0^{(H)} \equiv 0$$

Уравнение (13) имеет два вида порождающих решений: это тривиальное:

$$x_0 \equiv 0$$

и отличное от нуля периодическое, определяемое следующими формулами:

$$x_0 = A_1 c \cos \tau + A_3 c^3 \cos 3\tau + \dots \quad (15)$$

где

$$A_1 = 1 - \frac{1}{32} \frac{\gamma}{k^2} c^2 + \dots$$

$$A_3 = \frac{1}{32} \frac{\gamma}{k^2} - \frac{3}{128} \frac{\gamma^2}{k^4} c^2 + \dots \quad (16)$$

c — амплитуда начального отклонения.

$$T = \frac{2\pi}{k} \left(1 - \frac{3}{8} \frac{\gamma}{k^2} c^2 + \frac{57}{256} \frac{\gamma^2}{k^4} c^4 - \dots \right) \text{ — период колебаний.}$$

Для того, чтобы ненулевое решение было порождающим, необходимо, чтобы его период был кратен периоду возмущающей силы. Отсюда определяется при данных значениях k и γ величина начального отклонения $\pm c_m$, отвечающая этому условию. Так получается порождающее решение для гармоники m . Порождающие решения для каждой гармоники m , построенные в координатах $|x_{om}|_{max} = \psi(k)$ имеют вид параболических кривых, наклоненных к оси абсцисс и имеющих начала

при значениях k , равных номеру гармоники. Заметим одно важное для дальнейшего анализа свойство порождающих решений: они могут существовать только при значениях $k < m$.

Второе условие, которое необходимо наложить на решение порождающего уравнения, это чтобы начальная фаза τ [$\tau = m(t+h)$], которая являлась произвольной, удовлетворяла уравнению:

$$\sin mh \approx \frac{2Hmc_m A_1}{a} \quad (17)$$

При выполнении этих двух условий ненулевое решение порождающего уравнения будет являться первым приближением ряда решения полного уравнения (13) при $k < m$.

Решение полных уравнений определялось в виде соответствующих рядов из периодических коэффициентов по степеням малого параметра. Формы и характер полученных решений зависят от значений коэффициента k и формы порождающего уравнения.

Ниже приводятся аналитические выражения решений для третьей гармоники индукции.

Для значений k , значительно отличных от трех, справедливо нерезонансное решение, которое записывается рядом:

$$x_3^0 = \left[\frac{a}{3^2 - k^2} + \frac{3}{4} \frac{\gamma a^3}{(3^2 - k^2)^4} - \frac{4 \cdot 3^2 H^2 a}{(3^2 - k^2)^3} + \dots \right] \cos 3t + \left[-\frac{2 \cdot 3 \cdot H a}{(3^2 - k^2)^2} + \dots \right] \sin 3t + \dots$$

При k , равном или близком к трем, при малых H , действительно резонансное решение, имеющее вид:

$$x_3^p = - \left[\sqrt[3]{\frac{4a}{3\gamma}} + \frac{4\lambda}{9\gamma} \sqrt[3]{\frac{3\gamma}{4a}} + \dots \right] \cos 3t - \left[\frac{8}{3} \frac{3H}{\gamma} \sqrt[3]{\frac{3\gamma}{4a}} + \dots \right] \sin 3t \quad (19)$$

где

$$\lambda = 3^2 - k^2$$

В случае $k < 3$ при малых H существует также два после-резонансных решения, соответствующие нетривиальному порождающему решению вида:

$$x_3^H \approx \left[A_1 c_3 - \frac{a \cos 3h}{2KA^2 c_3^2} + \dots \right] \cos 3(t+h) +$$

$$+ \left[3H \left(\frac{4}{3\gamma A_1 c_3} + \frac{4A_1^2 c_3}{2KA} \right) + \frac{aA_1 \sin 3h}{4KA} + \dots \right] \sin 3(t+h) + \dots \quad (20)$$

Наконец, при больших H , решение имеет вид:

$$x_3 = \left[-\varepsilon \frac{a}{3} + \varepsilon^3 \frac{a}{3^3} (k^2 - 3^2)^2 + \dots \right] \sin 3t + \left[-\varepsilon^2 \frac{a}{3^2} (k^2 - 3^2) + \dots \right] \cos 3t + \dots \quad (21)$$

По полученным решениям для третьей гармоники индукции были рассчитаны числовые значения амплитуды x для различных значений k и H и двух значений емкости расчетной схемы опытной конструкции утроителя. При расчете изменение k производилось с помощью изменения индукции B_{1m} .

Как показал расчет и произведенный анализ, между различными формами решений нет резких границ, за исключением решения по формуле (20), которое является двузначным. Обычно, при изменении k одна форма решения плавно переходит в другую.

ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ. РЕЛЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ

По расчетным данным, подтвержденным опытом, были построены кривые изменения амплитуды x для третьей гармоники индукции в зависимости от коэффициента k для ряда постоянных значений H . Эти кривые имеют вид замкнутых резонансных кривых, верхняя часть которых смещена влево тем сильнее, чем меньше затухание H .

При возрастании H общий максимум кривых уменьшается и он смещается вправо, пока при некоторых больших значениях H кривая амплитуд не теряет резонансного характера.

Изогнутая часть резонансной кривой определяется формой решения (20) и предполагает наличие нетривиального решения порождающего уравнения, которое существует для третьей гармоники в области $k < 3$. В указанной области одному значению коэффициента k соответствуют 3 значения амплитуды x , два из которых устойчивы.

Наличие двух устойчивых значений $|x|_{m,x}$ делает область $k < 3$ нежелательной для нормальной работы утроителей, т. к.

путем изменения коэффициентов k и H можно получить релейный эффект в утроителе. Скачок с нижней части кривой амплитуд на верхнюю происходит при значениях k , близких к числу три. Скачок же с верхней кривой на нижнюю определяется уравнением (17). ($\sin 3h = 1$).

Таким образом, утроители должны иметь такие эквивалентные параметры, чтобы при изменении их режима они не заходили в области значений $k < 3$ из-за возможного релейного эффекта.

В работе показано, что при изменении k и H изменяется не только амплитуда третьей гармоники, но и ее начальная фаза по отношению к первой. В пределе при холостом ходе это изменение равно 2π , когда амплитуда скачком изменяет свою величину. В области $k > 3$ эта начальная фаза однозначно определяется коэффициентами k , H и B_{1m} , а, значит, ими же однозначно определяется и форма кривой индукции сердечников утроителей.

МАЛЫЕ АКТИВНЫЕ НАГРУЗКИ. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Режим холостого хода и малой активной нагрузки имеет свои особенности, которые потребовали особого рассмотрения. К таким особенностям относится явление автоколебаний низких частот, при определенных значениях k , а также появление больших по амплитуде посторонних гармоник в кривой вторичной э. д. с.

Выше было показано, что каждая гармоника индукции имеет свое порождающее решение. При этом нечетные гармоники намагничивающей силы в реальной конструкции утроителя вызывают хотя бы малые результирующие потокоцепления со вторичной обмоткой, которые являются возмущающими силами частоты нечетных гармоник. Эти возмущающие силы создают со своим порождающим решением картину изменения амплитуд нечетных гармоник, аналогичную картине изменения третьей гармоники. Так в кривой э. д. с. при определенных значениях k появляются большие 1, 5, 7, 9 и т. п. гармоники. Однако, они малостойки и резко уменьшают свою амплитуду уже при малой активной нагрузке, что вполне соответствует теории, положенной в основу решения. Однако, как показывает опыт, в кривой вторичной э. д. с. при определенных условиях появляются также четные гармоники, составляющих которых нет в возмущающих силах правой части уравнения колебаний. Поэтому четные гармоники в потокоцеплении могут

возникнуть только в виде свободных колебаний с амплитудами, определяемыми порождающими решениями для этих четных гармоник. Чтобы эти свободные колебания постоянно существовали, необходимо вынужденное колебание другой частоты, период которого кратен периоду данной четной гармоники и амплитуда его достаточна для того, чтобы отклонять координату x на величину не меньше, чем ga , которая при данном k определяется кривыми порождающих решений. Кроме того величина затухания не должна быть настолько большой, что свободное колебательное движение становится невозможным. Условия для возникновения интенсивных свободных колебаний четных гармоник имеются вблизи главного резонанса третьей гармоники, где вынужденное колебание с частотой третьей гармоники достигает достаточной амплитуды, но увлечения по третьей гармонике не происходит (как это имеет место при $k < 3$ в области послерезонансного решения). Опыт показывает, что в утроителях наблюдаются очень сильная четвертая гармоника, небольшая вторая. Шестой и более высоких четных гармоник в опытных утроителях не наблюдается. Опыт подтверждает, что изменение амплитуд колебаний четных гармоник имеет характер изменения амплитуд порождающих решений. Поэтому область их существования определяется уравнением $k < p$, где p — целое четное число. Для четвертой гармоники область существования $k < 4$.

Четкое определение границ четных гармоник (четвертой в частности) имеет серьезное значение для работы утроителей, т. к. с появлением четных гармоник при определенном минимуме активной нагрузки начинаются автоколебания низких частот, сопровождающиеся резкими изменениями амплитуд гармоник. Автоколебания вызываются обратной связью через постоянную составляющую индукции сердечников. Последняя вызывается совместным действием намагничивающих сил четной и нечетной гармоник, которые меняют свою величину при каждом цикле колебаний. Период колебаний изменяется в зависимости от k в широких пределах.

Хотя явление автоколебаний может быть использовано, однако, при утроении частоты оно должно быть исключено. Поэтому при малых активных нагрузках утроители не должны иметь значение коэффициента k , найденного для четвертой гармоники, меньше четырех.

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ УТРОИТЕЛЕЙ

На основе аналитического решения для третьей гармоники индукции, а также опытных данных произведен анализ изменения, в зависимости от обобщенных параметров, таких показателей утроителей как отдача активной мощности единицей объема стали, намагничивающие мощности первичной и вторичной цепей, затраты активных материалов. Опытные данные, построенные в относительных единицах и в зависимости от обобщенных параметров, являются достаточно характерными для утроителей, т. е. обладают достаточной общностью и могут быть использованы наравне с аналитическими данными.

Существенным показателем является отдача активной мощности единицей объема стали утроителей. Ее аналитическое выражение через обобщенные параметры имеет следующее выражение:

$$q_v = N 10^{8\beta} \frac{B_{1m}^4}{k^2} \psi(\alpha) H |x|_m^2 \frac{\text{ватт}}{\text{см}^3} \quad (22)$$

где

$$N = \frac{2\omega_1}{3} \left(\frac{4,44 \cdot 9 \cdot 10^8}{2\pi} \right)^2$$

Оно показывает, что вполне определенным значениям обобщенных параметров соответствует вполне определенная удельная отдача активной мощности. Поэтому для заданного сорта стали можно на основании испытания модели построить кривые удельной отдачи активной мощности в зависимости от обобщенных параметров k , H и B_{1m} или только от k и B_{1m} если определяется максимальная отдача активной мощности, т. к. $H |x|_m^2$ имеет один максимум в области $k \geq 3$.

Выражение (22) показывает также, что в зоне, где справедлива принятая формула кривой намагничивания, отдача активной мощности возрастает, примерно, пропорционально четвертой степени амплитуды первой гармоники индукции — B_{1m} , если величина коэффициента k остается постоянной (что возможно при одновременном возрастании величины емкости).

Изменение отдачи активной мощности при неизменной емкости характеризуется следующей формулой:

$$p_2 = \frac{k^2}{9} \frac{(|x|_m^2 H)_k}{(|x|_m^2 H)_{k=3}} \cdot \frac{\psi(\alpha)_{k=3}}{\psi(\alpha)_k} \quad (23)$$

Максимальная отдача, на основе формулы (23), возрастает, примерно, во второй степени от амплитуды B_{1m} . Поэтому определенной величины отдачи активной мощности можно достичь при меньшей амплитуде индукции B_{1m} , если изменение ее производить одновременно с изменением емкости при минимальном значении коэффициента k .

Величина амплитуды первой гармоники индукции анализом не определяется и ее значение должно быть выбрано в каждом конкретном случае.

При использовании ферромагнитных утроителей существенное значение имеет вопрос о намагничивающих мощностях первичной и вторичной цепей, т. к. в основном с ними связаны величины компенсирующих устройств и расход меди в утроителях. Поэтому как и для активной мощности произведен анализ изменения этих показателей в зависимости от изменения обобщенных параметров.

Удельная намагничивающая мощность первичной цепи записывается следующим образом:

$$r_{v1} = \frac{3}{2} \omega_1 \beta 10^{-8} B_{1m}^4 \varphi \frac{\text{вар}}{\text{см}^3} \quad (24)$$

где φ — коэффициент влияния нагрузки вторичной цепи, который меняется незначительно. Поэтому намагничивающая мощность первичной цепи, в области принятой формулы кривой намагничивания, изменяется, примерно, по четвертой степени амплитуды первой гармоники индукции и не зависит от способа изменения ее (при постоянной емкости или постоянном k). Отсюда следует вывод, что для увеличения коэффициента мощности первичной цепи (в области $k \geq 3$) необходимо брать значение коэффициента k минимальным, поскольку намагничивающая мощность уменьшается, примерно, в четвертой степени при уменьшении k — (B_{1m}), тогда как активная — во второй. Так же, как и отдача активной мощности, намагничивающая мощность вполне определяется обобщенными параметрами и потому может быть получена при испытании модели утроителя.

Удельная намагничивающая мощность вторичной цепи, создающая опережающую фазу вторичного тока, имеет аналитическое выражение:

$$r_{v2} = \frac{3}{2} N 10^{8\beta} \frac{B_{1m}^4}{k^2} \Psi(\alpha) |x|_m^2 \frac{\text{вар}}{\text{см}^3} \quad (25)$$

и, как видно, также определяется обобщенными параметрами и ее величина может быть определена при испытании модели. При увеличении k намагничивающая мощность уменьшается, особенно в диапазоне $3 \geq k \geq 4$ что, однако, не является решающим в выборе величины коэффициента k .

Затраты меди в первичной обмотке, определяемые в основном намагничивающей мощностью, изменяются, примерно, по кубу амплитуды первой гармоники индукции. Поэтому увеличение индукции (коэффициента k) при постоянной емкости приводит к увеличению удельных затрат меди, тогда как увеличение индукции совместно с емкостью при постоянном k дает уменьшение удельных затрат меди в первичной обмотке.

Затраты меди во вторичной обмотке, примерно, остаются постоянными при увеличении коэффициента k . Это приводит к уменьшению удельных затрат меди во вторичной обмотке.

Сопоставление общих показателей позволяет сделать вывод, что величину коэффициента k необходимо выбирать минимальной из условий устойчивости амплитуды или автоколебаний. Величина коэффициента H , если не ставятся специальные задачи, определяется исходя из максимальной отдачи активной мощности. Величина амплитуды первой гармоники индукции B_{1m} должна уточняться при проектировании.

* * *

Основные положения диссертации были доложены автором на двух итоговых научно-технических конференциях Ивановского энергетического института в апреле 1957 и апреле 1958 гг. По теме диссертации опубликованы следующие статьи:

1. Н. А. Галочкин — «Основы аналитического расчета утроителя частоты при активно-емкостной нагрузке». Сборник научных трудов Ивановского энергетического института. Выпуск VIII, ГЭИ, 1958 г.

2. Н. А. Галочкин — «Основные свойства утроителя частоты с активно-емкостной нагрузкой». Известия высших учебных заведений. Энергетика, № 5, 1958 г.

3. Н. А. Галочкин — «Характер колебаний в ферромагнитном утроителе частоты с емкостью и малой активной нагрузкой во вторичной цепи». Сборник научных трудов Ивановского энергетического института, вып. IX, 1959 г. ГЭИ.

2. Автореферат

Центральная научная библиотека
ГЭИ ИТЭА
Академия наук СССР

195773.

4. Н. А. Галочкин — «Границы области существования релейного эффекта в ферромагнитных утроителях частоты». ИВУЗ-Энергетика, 1960, № 8.

* *

*

Текст диссертации на 228 страницах состоит из введения, семи глав, заключения, приложений с данными экспериментов и расчетов и списка литературы. Список литературы включает 143 названия. В виде приложений приводится 76 рисунков, схем и осциллограмм.

Подписано к печати 2/IX-61 г. Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Печ. л. 1,25. Усл. п. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,08. КЕ—00641.
Заказ 1811. Тираж 240 экз.

Типография Ив. СНХ, г. Иваново, ул. Ермака, 41.