



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИНВЕРТОРОВ ТОКА

Г. Н. МОСКОВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы особенности работы инверторов тока. Получена функциональная зависимость длительности полупериода колебательного процесса инвертора тока от добротности контура. Выполненные аналитические расчеты тока инвертора представлены в графической форме в разных системах координат. Разработана новая методика расчета и рассчитаны новые частотно-временные характеристики инвертора тока.

Ключевые слова: инвертор тока, термообработка, комплексная частота, резонансная частота, угловая частота, добротность, колебательный контур, характеристическое сопротивление, длительность полупериода, рабочая частота, баланс мощности

В настоящее время инверторные источники питания все более широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе в области сварки и родственных технологий. Их преимущество заключается не только в уменьшении массогабаритных показателей и стоимости активных материалов источников питания, но и в существенном улучшении управляемости и качества технологических процессов.

Для термообработки сварных соединений и различных металлоконструкций индукционным нагревом в настоящее время широко используются инверторные источники питания с частотой преобразования 1...3 кГц и большой выходной мощностью, измеряемой десятками и сотнями киловольт-ампер. Несмотря на интенсивное развитие инверторной техники вопрос создания высококачественных и надежных источников питания для термообработки остается актуальным, что обусловлено требованиями, которые предъявляются к источникам питания (относительно большая мощность, продолжительность работы, условия эксплуатации).

Мощные инверторы для термообработки созданы преимущественно на основе инвертора параллельного типа (инвертора тока), базовая принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 1.

С целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик подобных преобразователей (особенно в плане повышения их управляемости и надежности), разработана схема нового мощного инвертора для термообработки, предназначенного для работы как в стационарных, так и полевых условиях. Предварительный анализ этой схемы показал ее превосходство над известными техническими решениями во многих аспектах. Однако при этом необходимо было вы-

полнить тщательный анализ происходящих переходных процессов. Имеющиеся в научно-технической литературе расчеты подобных инверторов дают только общую характеристику электромагнитных процессов в инверторах и не пригодны для разработки математически обоснованных алгоритмов управления ими. Для успешного решения поставленной задачи создана новая методика расчета таких инверторов с математически точными уравнениями тока и напряжения во всех элементах инвертора. При этом пришлось решить несколько проблем.

Первая была связана с рациональным выбором элементарных функций, описывающих переходные процессы в схеме инверторного источника питания. Она возникла в связи с тем, что в некоторых публикациях для описания переходных процессов в инверторах широко используются гиперболические тригонометрические функции — преимущественно синусы и косинусы [1, 2]. В то же время уже в первых вариантах полученных автором выражений для тока и напряжения в цепях инвертора гиперболические функции полностью отсутствуют. В известном учебнике по электротехнике [3] имеется определенное математическое доказательство нецелесообразности и

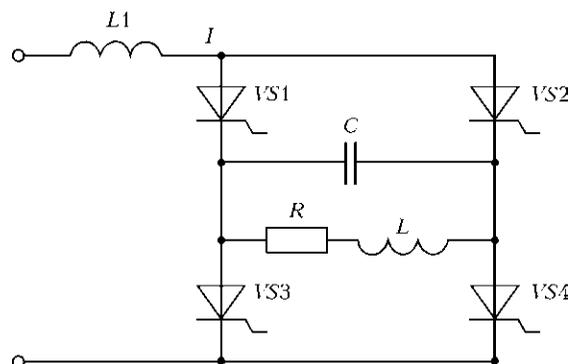


Рис. 1. Схема инвертора тока: I — ток выпрямителя; $VS1...VS4$ — тиристоры; R — сопротивление нагрузки; C — емкость конденсатора; L — эквивалентная индуктивность колебательного контура; $L1$ — индуктивность дросселя выпрямителя, питающего инвертор



даже ошибочности применения этих функций для описания колебательных процессов в RLC -цепях. Гиперболические синусы или косинусы появляются в уравнениях, описывающих аperiodические процессы. Для математического описания периодических колебательных процессов необходимо использовать периодические функции, которыми и являются обыкновенные тригонометрические синусы и косинусы. Тем более, что они почти автоматически появляются при решении дифференциальных уравнений, если при этом использовать формулы Эйлера. В дальнейшем автор строго придерживался классического решения составленных дифференциальных уравнений без использования гиперболических функций [4].

Вторая проблема связана с выбором оптимального метода решения исходных дифференциальных уравнений. Для напряжения u_c на конденсаторе окончательное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2}{dt^2}u_c + \frac{R}{L} \frac{d}{dt}u_c + \frac{1}{LC}u_c = \frac{RI}{LC}. \quad (1)$$

Как видно из (1), характеристическое уравнение в нашем случае ничем не отличается от характеристического уравнения для последовательного инвертора. Однако другие начальные условия в инверторе тока значительно усложняют решение этого уравнения. Автор пришел к выводу о необходимости вернуться к истоку получения описанных в литературе готовых математических выражений. Все решения исходных дифференциальных уравнений выполнены с использованием комплексных частот собственных колебаний, а их дальнейшие преобразования выполнялись в комплексной форме.

Только на завершающем этапе был осуществлен переход от полученных выражений в комплексной форме к привычным для нас экспоненциальным и тригонометрическим функциям. С этой целью использовали четыре наиболее типичные и часто встречающиеся комплексные функции, которые представляют собой математическое сочетание корней характеристического уравнения и их экспоненциальных функций. При отсутствии ошибок окончательный переход от комплексных функций к элементарным функциям осуществляется при полном исчезновении мнимых чисел, что было использовано как важнейший критерий правильности решения исходных дифференциальных уравнений.

Третья проблема связана с преобразованием полученных выражений до наглядного и показательного уровня, пригодного для дальнейшего практического применения. С целью упрощения полученных выражений традиционно введена новая переменная — фазовый угол $\theta = \omega t$, где ω —

угловая (круговая) частота колебательного контура с учетом затухания; t — реальное время. Полученные выражения удалось также несколько упростить путем введения в них добротности колебательного контура инвертора Q в качестве второй переменной. Все токи и напряжения колебательного контура были выражены в относительных единицах.

В качестве базовых единичных приняты следующие значения: $I = 1$ — ток источника, питающего инвертор; $\rho = 1$ — характеристическое сопротивление колебательного контура. В качестве единичных значений напряжения и мощности приняты соответственно следующие значения: $U = I\rho = 1$ и $P = I^2\rho = 1$. Таким образом, ток и напряжение в цепях инвертора представлены в относительных единицах как функции двух переменных — фазового угла θ и добротности колебательного контура Q .

В связи с отсутствием точной методики расчета даже таких упрощенных схем инверторов тока (см. рис. 1) было решено не учитывать на этом этапе реальные свойства тиристорных коммутаций считать равным нулю. С целью выяснения естественных свойств инвертора тока принятие в расчетах мгновенной коммутации тиристорных оправдано и даже необходимо.

При изменении времени t от 0 до $T/2$ (где T — период установившихся колебаний инвертора тока при нагрузке) фазовый угол θ изменяется от нуля до θ_m . Другими словами, параметр θ_m представляет собой полупериод колебательного процесса инвертора, выраженный в радианах. Обычно в электротехнических цепях переменного тока и различных колебательных контурах полупериод колебательного процесса в радианах всегда равен π . Однако несмотря на тщательную проверку правильности дифференциальных уравнений, анализ первых полученных результатов их решения показал, что если считать $\theta_m = \pi$, то стыковка начальных и конечных условий и завершение расчета становятся невозможными. Чаще всего это происходит при несоответствии принимаемых математических условий реальным физическим процессам. В связи с этим принято решение считать параметр θ_m величиной неизвестной, которая зависит от других параметров инвертора и ее следует определить. После чего стыковка начальных и конечных условий и получение искомого решения особых трудностей не вызывали, что также является своеобразным критерием правильности промежуточных расчетов. В ходе дальнейших преобразований получено трансцендентное уравнение, устанавливающее функциональную связь между значениями θ_m и Q :



$$\frac{\operatorname{tg} \theta_m}{\sqrt{4Q^2 - 1}} + \frac{1 + \left(\cos \theta_m + \frac{\sin \theta_m}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \right) e^{-\theta_m / (\sqrt{4Q^2 - 1})}}{1 + \left(-\cos \theta_m + \sqrt{4Q^2 - 1} \sin \theta_m \right) e^{-\theta_m / (\sqrt{4Q^2 - 1})}} = 0. \quad (2)$$

С целью однозначного определения параметра θ_m как функции добротности Q отработана простая и эффективная методика компьютерного решения полученного трансцендентного уравнения. Для проверки правильности компьютерного расчета параметра θ_m некоторые контрольные точки были определены методом последовательных приближений на программируемом микрокалькуляторе. На основании полученной зависимости $\theta_m(Q)$ выполнены дальнейшие преобразования с целью получения приемлемых выражений токов и напряжений в цепях инвертора. Необходимо подчеркнуть, что на всех этапах осуществлялись чисто математические преобразования и упрощения, а не пренебрежение теми или иными величинами, например, в силу их малости. Кроме того, на всех этапах выполняли дополнительную проверку получаемых выражений путем введения в них бесконечной добротности и преобразования их в простые и наглядные уравнения для идеального колебательного контура. В результате получены математически точные уравнения, описывающие изменения токов и напряжений в цепях инвертора. Проверку окончательных выражений для токов и напряжений методом расчета баланса мощностей выполняли на компьютере в программе MathCAD, при этом получено полное равенство входной мощности, потребляемой от источника тока и выделяющейся в нагрузке. Это подтверждает достоверность полученных аналитических зависимостей, а также правильность всех выполненных расчетов. Кстати, автор не нашел работ по инверторам, где бы выражения для тока и напряжения, содержащие гиперболические синусы и косинусы, проверялись методом расчета баланса мощностей. Вероятно, применение некоторыми исследователями гиперболических синусов и косинусов для описания колебательного процесса в инверторах тока может быть объяснено тем, что длительность полупериода колебаний в радианах ошибочно считалась величиной постоянной, всегда равной π , в то время как существует определенная математическая зависимость этой длительности от добротности контура. Таким образом, сделанный ранее вывод о некорректности применения гиперболических синусов и косинусов для описания колебательного процесса нашел еще одно своеобразное математическое подтверждение.

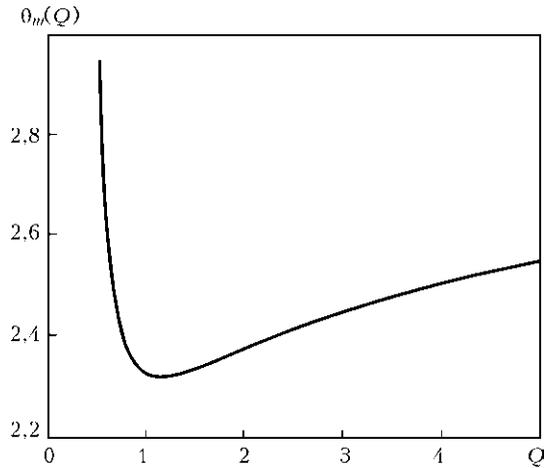


Рис. 2. Зависимость длительности полупериода колебаний в инверторе тока θ_m от добротности Q

Рассмотрим некоторые результаты выполненных исследований. Анализ зависимости $\theta_m(Q)$, представленной на рис. 2, показал, что при увеличении добротности колебательного контура выше минимального критического значения ($Q > 0,5$) длительность полупериода колебаний в радианах резко уменьшается, а при $Q_2 = 1,124$ достигает минимального значения $\theta_{\min} = \theta_m(Q_2) = 2,319$. При дальнейшем увеличении добротности значения исследуемой величины $\theta_m(Q)$ монотонно возрастают и при $Q \rightarrow \infty \theta_m(Q) \rightarrow \pi$, что и следовало ожидать. Ниже приведено также несколько числовых значений параметра $\theta_m(Q)$:

Q	1	2	4	10	50	200	1000	10000	100000
$\theta_m(Q)$	2,323	2,375	2,505	2,683	2,911	3,021	3,086	3,124	3,136

Таким образом, установлена важнейшая характеристика параллельного колебательного контура в составе инвертора тока — длительность полупериода колебательного процесса в радианах зависит от добротности контура и изменяется в пределах $\theta_{\min} \leq \theta_m(Q) \leq \pi$.

Отсюда возникает вопрос: почему в параллельных колебательных контурах инвертора тока длительность полупериода колебательного процесса $\theta_m(Q)$ всегда меньше π и выражается довольно сложной математической зависимостью от добротности, в то время как в последовательных колебательных контурах инвертора напряжения этот полупериод от добротности не зависит и всегда равен π ? И это при том, что угловая частота $\omega(Q)$ в обоих случаях определяется одной и той же зависимостью

$$\omega(Q) = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (3)$$

Этому есть определенное физическое объяснение. В последовательном колебательном кон-



туре ток изменяется по известному закону экспоненциально затухающей синусоидальной функции и угловая длительность полупериода колебаний в радианах независимо от степени затухания всегда равна π . Подключение источника постоянного напряжения к последовательному колебательному контуру не вносит качественных изменений в характер протекания переходного процесса. Он остается таким же, как и при разряде конденсатора на активно-индуктивную нагрузку.

В рассматриваемой схеме инвертора тока наблюдается совершенно иная картина. Подключение источника тока к параллельному колебательному контуру вызывает качественные изменения в характере протекания переходного процесса и происходит уменьшение (укорочение) длительности полупериода колебаний до определенного значения $\theta_m(Q)$. Таким образом, полученное выражение $\theta_m(Q)$ отображает не только свойства самого параллельного колебательного контура, но и внешней схемы его включения, определяющей характер поступления энергии в этот контур от источника тока.

С помощью метода комплексных амплитуд рассмотрим уменьшение длительности полупериода колебаний инвертора тока. При этом электрический ток в нагрузке может быть представлен в виде вектора, вращающегося против часовой стрелки с некоторой угловой скоростью. Действительное мгновенное значение тока равно проекции этого вектора на вещественную ось в определенный момент времени. В идеальном колебательном контуре без потерь скорость вращения вектора тока определяется угловой резонансной частотой ω_0 . При конечной добротности колебательного контура, т. е. наличии потерь, скорость вращения вектора тока уменьшается и определяется угловой частотой $\omega(Q)$ по уравнению (3). При неизменной добротности колебательного контура угловая скорость $\omega(Q)$ вращения вектора тока остается постоянной, однако амплитуда этого вектора изменяется во времени. Характер этого изменения определяется двумя факторами. Вследствие потерь энергии в нагрузке происходит уменьшение (затухание) амплитуды вектора тока. Однако вследствие поступления энергии в колебательный контур от источника тока амплитуда вращающегося вектора возрастает. В начале полупериода при $\theta = 0$ вектор тока располагается на вещественной оси и его проекция на эту ось равна его амплитуде. К моменту окончания полупериода угол поворота вектора тока составляет $\theta_m(Q)$ рад, однако его амплитуда в итоге увеличивается так, что его проекция на вещественную ось равна начальной амплитуде вектора тока, взятой с противоположным знаком. Проекция вектора тока на вещественную ось в конце полупе-

риода принимается за новый вектор тока в начале следующего полупериода после очередной коммутации тиристорov. Новый вектор тока начинает свой этап поворота на угол $\theta_m(Q)$. Таким образом, исследуемый процесс не может быть описан с помощью вектора тока, непрерывно вращающегося с угловой частотой $\omega(Q)$. Имеются отдельные периодически повторяющиеся угловые секторы $\theta_m(Q)$, в пределах которых вектор тока вращается с постоянной угловой скоростью $\omega(Q)$. Переход из одного сектора в другой (при коммутации тиристорov) сопровождается скачкообразным изменением амплитуды и фазы вектора тока.

В своем измерении параметр $\theta_m(Q)$ непосредственно связан с угловой частотой $\omega(Q)$, которая появляется при решении дифференциальных уравнений с применением комплексных частот собственных колебаний. Применяемый математический метод исследования колебательных процессов фактически предлагает нам полярную систему координат, в которой исследуемый вектор тока вращается с постоянной угловой частотой $\omega(Q)$, определяемой только параметрами колебательного контура. Все изменения колебательного процесса, вызываемые в течение одного полупериода активными потерями энергии (затуханием), а также подачей энергии в колебательный контур, могут отразиться только на амплитуде этого вращающегося вектора тока. Значение $\theta_m(Q)$, рассматриваемое нами как полупериод колебательного процесса, оказывается меньше π , поскольку оно определяется свойствами всего инвертора в целом, а фактически измеряется в первоначальных полярных координатах, заданных параметрами только колебательного контура. Принято считать, что период вращения любого вектора равен 2π , где 2π — радианная мера окружности. В нашем случае период $2\theta_m(Q)$ не равен 2π . Мы уже объяснили причину возникновения этого неравенства тем, что при коммутации тиристорov в инверторе тока нет непрерывного вращения вектора, а есть периодические повороты вектора на определенный угол $\theta_m(Q)$ с последующим изменением начальных условий. Это кажущееся противоречие может быть устранено, если перейти в другую полярную систему координат, где новый вектор тока непрерывно вращается с некоторой увеличенной эквивалентной угловой частотой ω_e и период его вращения составляет 2π . Тогда истинное значение периода установившихся колебаний инвертора тока в секундах может быть определено общеизвестной зависимостью $T = 2\pi/\omega_e$. Непосредственное численное определение ω_e представляет значительные трудности. Далее будет показано, как с помощью углового параметра



$\theta_m(Q)$ можно легко вычислить новую эквивалентную угловую частоту ω_e инвертора тока.

Таким образом, получена математическая зависимость полупериода инвертора тока $\theta_m(Q)$, которая однозначно определяется только добротностью своего колебательного контура. Значение $\theta_m(Q)$ не зависит от тока, питающего инвертор, но, тем не менее, оно одновременно отражает те качественные изменения, которые произошли в колебательном контуре под воздействием источника тока. Поэтому определенное значение длительности $\theta_m(Q)$ полупериода колебательного процесса является новым важнейшим характеристическим параметром инвертора тока, своеобразным ключевым элементом к его дальнейшим аналитическим расчетам. Значение $\theta_m(Q)$ позволяет получить точные математические уравнения токов и напряжений во всех контурах инвертора тока, рассчитать необходимые истинные частотно-временные и энергетические параметры, естественные внешние характеристики, а также разработать оптимальные алгоритмы управления инвертором тока.

На рис. 3 представлена зависимость тока в нагрузке $i(\theta, Q)$ от фазового угла θ в течение одного полупериода при добротности контура $Q = 2$, при этом длительность периода тока $2\theta_m(2) = 4,75$, что значительно меньше 2π .

Разделив $i(\theta, Q)$ на $\cos \theta$, получим выражение $A(\theta, Q) = i(\theta, Q)/\cos \theta$ для определения амплитуды вращающегося вектора тока, с помощью которого описывается колебательный процесс исследуемого инвертора согласно методу комплексных амплитуд. Полученная зависимость $A(\theta, Q)$ представлена на рис. 4 в полярных координатах и графически иллюстрирует переходный процесс в инверторе тока. Можно отметить сложный закон изменения амплитуды вектора тока в течение полупериода. После очередной коммутации тиристоров действительное значение тока $A3$ в нагрузке принимается за его начальное значение и начинается следующий полупериод колебательного процесса инвертора. При этом вектор $A3$ повернется на угол $\theta_m(Q)$ и превратится в вектор $A4$, проекция которого на действительную ось равна $A1$. Очевидно, что $A4 = -A2$. На этом заканчивается полный период колебательного процесса инвертора тока.

Перейдем к расчету новых частотно-временных параметров инвертора тока. Поскольку $\theta_m(Q) = \omega(Q)T(Q)/2$, получим формулу для определения истинного периода установившихся колебаний инвертора тока в секундах

$$T(Q) = \frac{2\theta_m(Q)}{\omega(Q)}. \quad (4)$$

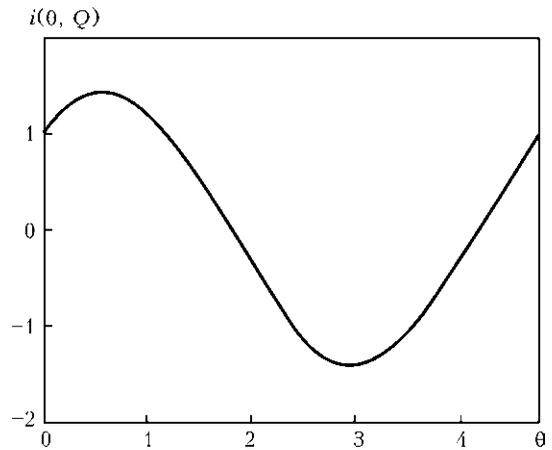


Рис. 3. Зависимость тока в нагрузке $i(\theta, Q)$ от фазового угла θ при добротности контура $Q = 2$

Легко доказать, что при $Q = \infty$ (т. е. для идеального колебательного контура без потерь) формула (4) дает известное выражение $T(\infty) = 2\pi/\omega_0 = T_0$. Из этой формулы получим выражение для определения новой эквивалентной угловой частоты $\omega_e(Q) = 2\pi/T(Q)$ как функциональной зависимости от добротности:

$$\omega_e(Q) = \omega(Q) \frac{\pi}{\theta_m(Q)} = \omega_0 \frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (5)$$

В новой системе координат вектор тока вращается непрерывно с угловой скоростью ω_e и его фазовый угол изменяется со временем по формуле $\theta_e = \omega_e t = \theta/k$, где $k = \theta_m(Q)/\pi$; $\theta = \omega t$ — фазовый угол в прежней системе координат. Новая зависимость тока в нагрузке $i_e(\theta_e, Q)$ от фазового угла θ_e может быть получена из представленной на рис. 3

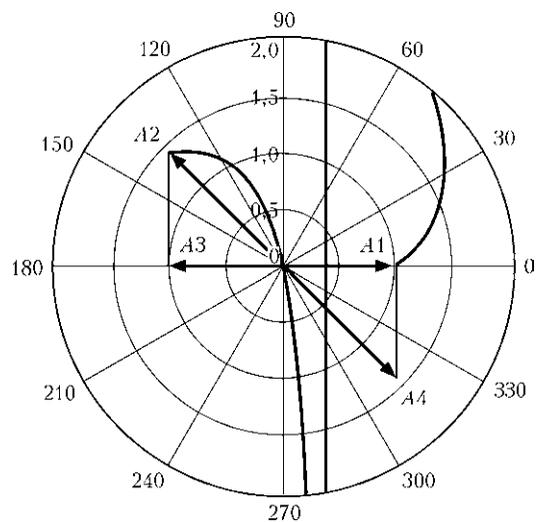


Рис. 4. Зависимость амплитуды вращающегося вектора тока $A(\theta, Q)$ от фазового угла θ при добротности $Q = 2$: $A1$ — начальное положение вектора тока; $A2$ — конечное положение вектора тока после его поворота на угол $\theta_m(Q)$ и соответствующего изменения амплитуды; $A3$ — проекция вектора $A2$ на действительную ось ($A3 = -A1$)

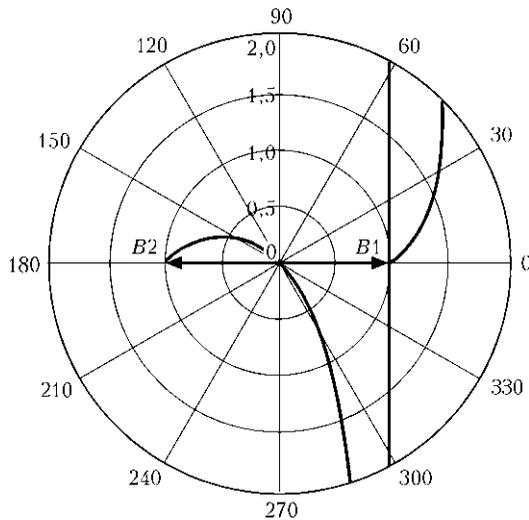


Рис. 5. Зависимость амплитуды $B(\theta_e, Q)$ эквивалентного вектора тока от фазового угла θ_e при $Q = 2$: $B1, B2$ — положения вектора тока при $\theta_e = 0$ и $\theta_e = \pi$, т. е. в моменты коммутации тиристоров (при этом $B1 = -B2$)

зависимости $i(\theta, Q)$, если вместо угла θ подставить $\theta_e k$. Форма тока при этом не изменится, а период тока $i_e(\theta_e, Q)$ в радианах будет равен 2π . Зависимость амплитуды $B(\theta_e, Q) = i_e(\theta_e, Q)/\cos(\theta_e)$ непрерывно вращающегося вектора тока от угла θ_e в новой системе координат для сравнения представлена на рис. 5.

В новой системе координат приведены результаты аналитических расчетов приведены к традиционному представлению о том, что период колебательного процесса в радианах равен 2π . Для этого пришлось покинуть первоначальную систему координат, которая определяется непосредственно параметрами колебательного контура и лежит в основе всех выполненных расчетов. В этой первоначальной системе координат период колебательного процесса в исследуемом инверторе тока не равен 2π . Таким образом, выполненные автором исследования не опровергают, а лишь дополняют и уточняют широко известные основополагающие классические знания по этому вопросу.

Реальная частота установившихся колебаний инвертора тока составляет

$$f(Q) = 1/T(Q) = \omega(Q)/2\theta_m(Q). \quad (6)$$

Относительная частота установившихся колебаний инвертора тока $f_1(Q) = f(Q)/f_0 = \omega_e(Q)/\omega_0$ может быть представлена следующим образом:

$$f_1(Q) = \frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (7)$$

Зависимость $f_1(Q)$ рассчитана и показана на рис. 6. Для сравнения на этом же рисунке представлена зависимость относительной частоты ко-

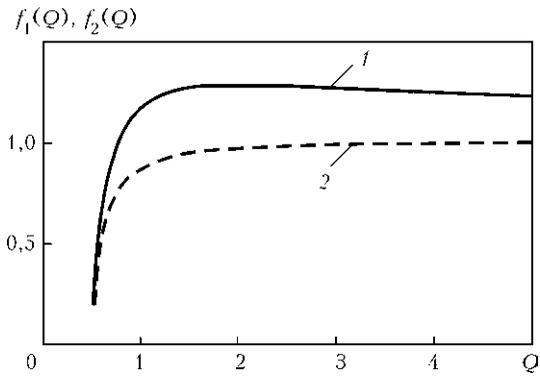


Рис. 6. Зависимости относительной частоты колебаний инверторов тока $f_1(Q)$ (1) и напряжения $f_2(Q)$ (2) от добротности Q

лебаний от добротности для последовательного колебательного контура

$$f_2(Q) = \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}.$$

Как видно из рис. 6, обе зависимости при $Q \rightarrow \infty$ асимптотически приближаются к единице, однако $f_2(Q)$ приближается к ней снизу, а $f_1(Q)$ — сверху. Причем, всегда $f_1(Q) > f_2(Q)$. Это свидетельствует о том, что увеличение частоты инвертора тока вследствие уменьшения длительности полупериода колебательного процесса доминирует над уменьшением этой частоты вследствие затухания. Таким образом, при анализе и расчете инверторов тока определенная зависимость $\theta_m(Q)$ имеет не только важное качественное, но и количественное значение, поскольку позволяет существенно повысить точность расчетов всех необходимых частотно-временных и энергетических параметров.

Известно, что если добротность колебательного контура меньше критического значения $Q_0 = 0,5$, то колебательный процесс переходит в аperiodический процесс. Зависимость $f_1(Q)$ дает дополнительные характеристические значения добротности параллельного колебательного контура инвертора тока, на которые следует обратить внимание.

Так, $Q_1 = 0,766$ представляет собой добротность колебательного контура инвертора тока, при которой относительная частота инвертирования $f_1(Q_1) = 1$, т. е. частота тока в колебательном контуре несмотря на наличие потерь равна резонансной частоте колебаний идеального контура без потерь. Значение $Q_1 = 0,766$ может быть принято за минимально возможное значение рабочей добротности. Однако номинальное значение добротности следует выбирать больше ($Q_2 = 1,124$), особенно при нестабильной нагрузке. Это необходимо для того, чтобы даже при максимальном увеличении сопротивления нагрузки, например, вследствие переходных процессов, минимальное



значение добротности не опустилось ниже Q_1 . В противном случае при $Q < Q_1$ происходит резкое снижение частоты работы инвертора, что может вызвать или нарушение самого технологического процесса, или дальнейшее снижение добротности до критического значения $Q = 0,5$ и полного нарушения устойчивого цикла инвертирования. Диапазон добротностей $Q_1 < Q < Q_2$ можно рассматривать как разделительный участок между устойчивым ($Q > Q_2$) и недостаточно устойчивым ($Q < Q_1$) режимами инвертирования.

Величина $Q_M = 2$ является еще одним определенным характеристическим значением добротности параллельного колебательного контура в составе инвертора тока, при котором обеспечивается максимальная относительная частота колебательного процесса $f_M = f_1(Q_M) = 1,28$. Если характеристическое сопротивление колебательного контура $\rho = (L/C)^{0,5}$ остается неизменным, то при $Q_M = 2$ можно определить значение сопротивления нагрузки, при которой достигается максимальная относительная частота работы инвертора:

$$R_M = \rho/Q_M \tag{8}$$

Согласование любого значения реального сопротивления нагрузки с расчетным ее значением R_M осуществляется с помощью высокочастотного силового трансформатора.

Таким образом, полученные зависимости $\theta_m(Q)$ и $f_1(Q)$ позволяют произвести оптимальный выбор добротности инвертора тока. Значения добротности свыше 50 обычно характерны для радиотехнических контуров, в связи с этим они не рассматриваются нами, хотя полученные зависимости остаются справедливыми для всех добротностей. Для сварочных и других мощных промышленных инверторов тока желательно иметь минимальные значения добротности с целью снижения мощности силовых элементов схемы. Однако при колебаниях сопротивления нагрузки схема должна иметь определенный запас по устойчивости колебательного процесса. Полученная зависимость $f_1(Q)$ дает математически обоснованный выбор диапазона рабочих добротностей Q_w инверторов тока:

$$1,5 < Q_w < 3. \tag{9}$$

Характерной особенностью этого диапазона добротностей является незначительное изменение рабочей частоты инвертора. В этом же диапазоне находится характеристическое значение добротности $Q_M = 2$ инвертора тока, при которой относительное увеличение частоты инвертора максимальное. Отклонения сопротивления нагрузки от значения R_M в определенных пределах изме-

нения добротности ($1,5 < Q < 3,0$) не приводят к существенным изменениям частоты инвертирования. Для постоянных стабильных нагрузок рабочая добротность может быть меньше 1,5 и приближаться к Q_2 .

Результаты расчета и анализа для сравнения частотно-временных свойств параллельного и последовательного инверторов сведены в таблицу. Как видно из данных таблицы, первые три параметра инвертора тока и инвертора напряжения вычисляются совершенно одинаково. Их появление обусловлено общепринятым математическим методом решения исходных дифференциальных уравнений с использованием комплексных частот собственных колебаний. В трех последних параметрах длительность полупериода колебательного процесса, выраженная в радианах и равная числу π для последовательного колебательного контура инвертора напряжения, заменена сложной математической зависимостью $\theta_m(Q)$, рассчитанной автором для параллельного колебательного контура инвертора тока. С ее помощью осуществляется переход к реальным частотно-временным параметрам инвертора тока.

Таким образом, полученные зависимости помогают глубже проникнуть в самую суть происходящих физических явлений в схеме инвертора тока, осуществить правильный выбор и расчет силовой части инвертора и его элементов. На основании этих зависимостей легко выработать обоснованные алгоритмы управления тиристорами инвертора, причем как при его запуске, так и в процессе работы при формировании требуемых внешних характеристик, что не противоречит естественному ходу переходных процессов в элементах инвертора.

На основе установленной и определенной функциональной зависимости $\theta_m(Q)$ разработаны точные аналитические выражения тока, напряжения и мощности. Это позволило раскрыть более полно

Сравнительные параметры параллельного и последовательного инверторов

Параметр	Инвертор тока	Инвертор напряжения
ω_0	$2\pi f_0$	$2\pi f_0$
$\frac{\omega(Q)}{\omega_0}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$
T_0	$\frac{2\pi}{\omega_0}$	$\frac{2\pi}{\omega_0}$
θ_m	$\theta_m(Q)$	π
$T(Q)$	$\frac{2\theta_m(Q)}{\omega(Q)}$	$\frac{2\pi}{\omega(Q)}$
$\frac{f(Q)}{f_0}$	$\frac{\pi}{\theta_m(Q)} \sqrt{1 - 1/4Q^2}$	$\sqrt{1 - 1/4Q^2}$



энергетические параметры инвертора тока, построить его естественные внешние характеристики. Более подробный анализ этих вопросов автор планирует изложить в своей следующей работе.

Выводы

1. Полученная функциональная зависимость длительности полупериода рабочей частоты $\theta_m(Q)$ от добротности контура Q является ключевым элементом к расчету всех параметров инвертора тока.

2. Предложенная новая методика расчета инверторов тока позволяет получить необходимые частотно-временные параметры, а также точные аналитические выражения для тока и напряжения, правильность и достоверность которых подтверждается методом расчета баланса мощности.

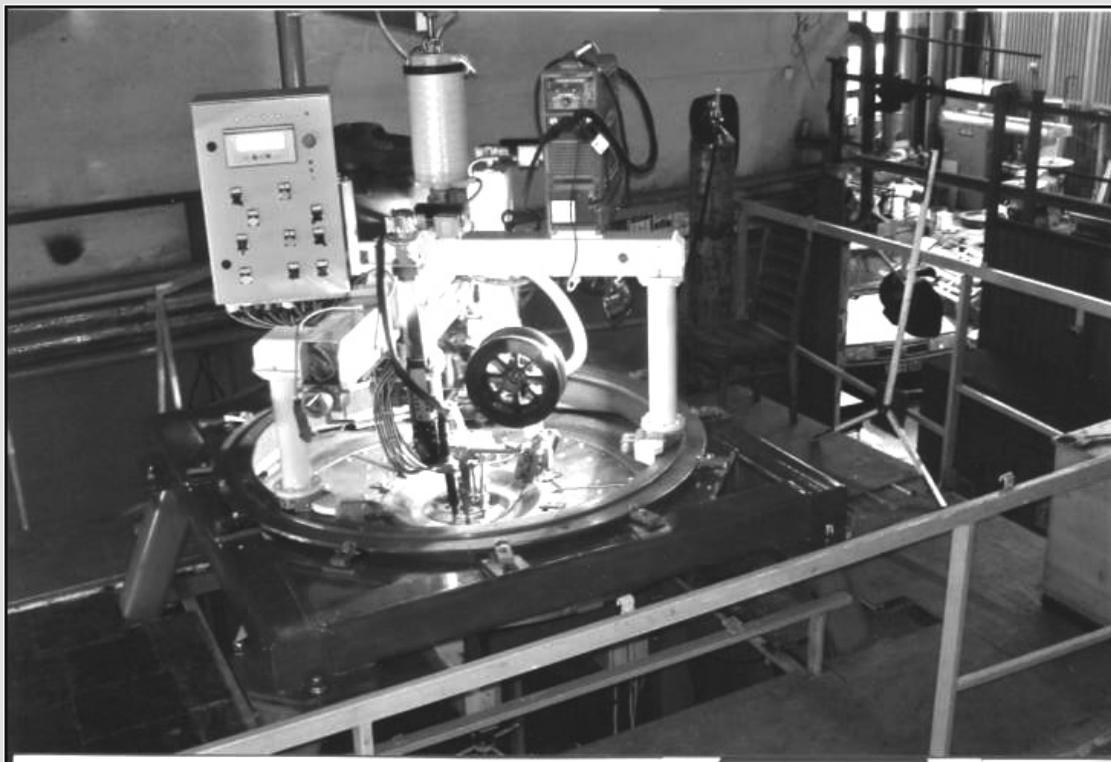
3. Выявленные отличительные особенности работы параллельного колебательного контура в составе инвертора тока дают возможность предложить и рассчитать его новые характеристические параметры.

1. *Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок* / Е. И. Беркович, Г. В. Ивенский, Ю. С. Иоффе и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 208 с.
2. *Бальян Р. Х., Сиверс М. А.* Тиристорные генераторы и инверторы. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 223 с.
3. *Матханов П. Н.* Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 1981. — 333 с.
4. *Москович Г. Н.* Разработка нового мощного инвертора для термообработки: Тез. докл. науч.-практ. семинара «Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике», г. Киев, 12–15 окт., 2004 г. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2004. — С. 15–17.

Features of current inverter operation are studied. Functional dependence of the duration of half-period (in radians) of the current inverter oscillatory process on tuned-circuit Q -factor was derived. Performed analytical calculations of inverter current are presented in the graphic form in different systems of coordinates. A new design procedure was developed and new frequency-time characteristics of current inverters were calculated.

Поступила в редакцию 21.01.2009

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БЕЗДЕФОРМАЦИОННОЙ СВАРКИ КРУГОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ



Автоматизированная установка для аргодуговой сварки круговых швов с применением предварительного упругого изгиба и фрезерования кромки отверстия под фланец