УДК 621.365.5:669

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

И. И. ЗЛОТНИКОВ
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

И. В. ЗАХАРОВ
Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, Республика Казахстан

Введение

Снижение потерь активной мощности в электротехнических и электротехнологических установках является важной технико-экономической задачей. Особенно актуально решение этой задачи для электротермических, в частности, индукционных нагревательных установок, используемых в металлургической, машиностроительной, нефтехимической и прочих энергоемких отраслях промышленности. Мощность индукционных установок на промышленных предприятиях названных отраслей достигает десятков мегаватт, что предопределяет достаточно большие потери активной мощности.

Цель работы – на основе литературных данных провести анализ факторов, влияющих на реактивную мощность системы «индуктор–загрузка», и сформулировать пути повышения эффективности работы индукционных нагревательных установок.

Анализ состояния проблемы повышения эффективности работы индукционных нагревательных установок

Одним из важных энергетических показателей, определяющих эффективность работы индукционных устройств, является их коэффициент полезного действия (КПД).

Идеальный электрический КПД системы «индуктор–загрузка» для идеализированной плоской системы, когда индуктор и загрузка являются полубесконечными телами [1], определяется по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\rho_1 \mu_1}}{\sqrt{\rho_2 \beta \mu_2}}},$$

где ρ_1, ρ_2 – удельное электрическое сопротивление индуктора и загрузки, соответственно, Ом · м; μ_1, μ_2 – относительная магнитная проницаемость индуктора и загрузки, соответственно.

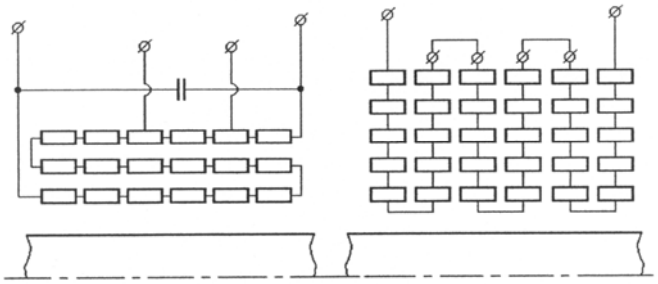
Из приведенной формулы следует, что для получения наибольшего КПД материал индуктора должен иметь минимальное удельное электрическое сопротивление и быть немагнитным, а загрузка, напротив, должна обладать большим ρ_2 и быть ферромагнетиком.

Электрический КПД цилиндрической системы «индуктор–загрузка» зависит не только от электрофизических свойств материалов индуктора и загрузки, но и от их

геометрических размеров и частоты тока в индукторе [2]–[4]. Зависимость КПД от геометрии системы носит сложный характер, так как помимо отношения диаметров индуктора и загрузки еще учитываются поправочные функции, определяющие, во сколько раз значения активной и реактивной мощности для проводящих тел конечных размеров отличаются от значений этих же величин для полубесконечных тел. Во многих случаях кривизной индуктора можно пренебречь и рассматривать его как плиту (функция $F_{пл}$), а цилиндрическая форма загрузки учтена функцией $F_{ц}$. Так как $F_{пл}$ и $F_{ц}$ зависят от глубины проникновения электромагнитной волны $\Delta_э$ и, следовательно, от частоты, то и электрический КПД также зависит от частоты, причем $\eta_{эл}$ возрастает с увеличением частоты до некоторого предельного значения [5], [6].

Одним из способов снижения потерь активной мощности в нагревательном индукторе является использование многослойных обмоток.

Электрические потери в многослойной обмотке в значительной степени зависят от ее конструкции и при правильном выборе токоведущих проводников могут быть заметно меньше, чем в однослойной обмотке. Поэтому наибольший эффект применения многослойных обмоток достигается в установках большой мощности, в особенности при нагреве сплавов с низким удельным сопротивлением на основе меди и алюминия. Первые многослойные индукторы представляли собой концентрические соленоиды, включенные последовательно. Число слоев-соленоидов обычно не превышало трех. Такие индукторы обладали низкой ремонтопригодностью и часто имели электрический КПД ниже, чем однослойные, на наружном слое индуктора имелись отпайки, что позволяло использовать автотрансформаторную схему включения индуктора для регулировки мощности в широком диапазоне при неизменном напряжении питания (рис. 1, *а*). В последние годы [7]–[9] отдается предпочтение многослойным индукторам, выполненным из последовательно соединенных секций в виде галет (рис. 1, *б*). Число слоев в галете: 5–6. Такие индукторы обладают хорошей ремонтопригодностью и при правильном выборе сечения токоведущих проводников – высоким электрическим КПД. Регулировка мощности осуществляется переключением ступеней трансформатора.



а) *б*)

Рис. 1. Схемы многослойных индукторов

Расчет электромагнитного поля и потерь в многослойных обмотках индукторов представляет довольно сложную задачу даже при введении ряда допущений. Электрические потери в обмотках индукторов при заданном токе главным образом зависят от конструкции и размеров обмотки, конфигурации сечения токоведущих проводников и электрических свойств материала токоведущих проводников. Основные физические процессы в многослойных обмотках можно проанализировать, рассмотрев витки в средней части индуктора. Здесь можно считать, что витки обмоток находятся в продольном магнитном поле и потери в них являются определяющими для

всего индуктора. Потери от радиальной составляющей магнитного поля имеют заметную величину лишь для коротких индукторов и при сильно выраженном поверхностном эффекте в токоведущих проводниках. Как показали исследования [10], в индукторах на промышленной частоте дополнительные потери в крайних витках невелики. Суммарное собственное активное сопротивление индуктора мало отличается от сопротивлений, вычисленных без учета краевых эффектов.

Для относительно длинного индуктора напряженность наружного магнитного поля пренебрежимо мала. Тогда витки многослойной обмотки находятся в таких же условиях, как проводники в пазу магнитопровода. Каждый проводник, кроме верхнего, находится не только в собственном переменном магнитном поле, но и в поле всех вышележащих проводников. Это приводит к сложному перераспределению плотности тока по высоте проводников при сохранении того же значения полного тока. Активное сопротивление нижних слоев увеличивается, также как и электрические потери в них. Разница в потерях по слоям может быть значительной и тем большей, чем резче проявляется поверхностный эффект. Полное сопротивление и потери в обмотке сильно зависят от конструкции токоведущих проводников. Оптимальной является обмотка из плотно намотанных сплошных проводников прямоугольного сечения переменной толщины. Для каждого слоя обмотки существует оптимальная толщина проводника, при которой потери в нем минимальны. Чем больше величина стороннего магнитного поля (чем ближе слой к загрузке), тем при меньшей толщине проводника этот минимум наступает.

Например, в табл. 1 [11] приведены оптимальные толщины проводника по слоям для шестислойного индуктора, где слой № 1 – наружный слой индуктора; d_1 – толщина проводника индуктора; δ_1 – толщина слоя, равная глубине проникновения электромагнитной волны в материал проводника.

Таблица 1

Оптимальные толщины провода по слоям для шестислойного индуктора

Номер слоя	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Относительная толщина проводника, d_1 / δ_1	1,57	0,84	0,64	0,54	0,48	0,44

Использование переменной толщины проводника по слоям усложняет изготовление индуктора. Более практично использовать для каждого слоя токоведущие проводники одной толщины. Оптимальная толщина проводника для *N*-слойного индуктора определяется по формуле

$$d = \frac{1{,}32\Delta_1}{\sqrt{Ng}},$$

где Δ_1 – глубина проникновения электромагнитной волны в материал индуктора, мм; g – коэффициент заполнения обмотки индуктора.

По сравнению с лучшей однослойной обмоткой потери в многослойной обмотке с той же намагничивающей силой будут в *N* раз меньше, что позволяет создавать многослойные индукторы с высоким КПД.

Такие опытные индукторы из медного провода толщиной 3 мм впервые были изготовлены в Капенхерсте (Англия) [12]. Число слоев в секциях индукторов галетного типа составляло 10–12. Для охлаждения индуктор помещался в герметичную емкость с циркуляцией воды. Индукторы имели высокий электрический КПД.

При конструировании многослойных индукторов возможны два пути [10]. Первый заключается в создании токоведущих проводников из медной шины оптимальной толщины и приваренной или припаянной к ней камеры охлаждения из материала с высоким удельным сопротивлением. Камера обычно изготовляется из тонкостенной трубки из нержавеющей стали или мельхиора. Индукторы из таких биметаллических токоведущих проводников имеют высокий электрический КПД, близкий к предельному. Это достоинство особенно проявляется при небольшом числе слоев, не превышающем 3–4. Недостаток такой конструкции – резкое удорожание стоимости индуктора и отсутствие отлаженной технологии изготовления токоведущих проводников.

Другой путь заключается в использовании токоведущих проводников с внутренней камерой охлаждения и с сечением, симметричным относительно двух осей. Размеры камеры охлаждения необходимо брать минимально возможными. Тогда для каждого числа слоев в индукторе N можно определить оптимальную толщину токоведущих проводников, которую необходимо использовать при нагреве на частоте 50 Гц (табл. 2) [11]. В табл. 2 приведены оптимальные толщины токоведущего проводника, изготовленного как из меди ($\rho_1 = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ Ом · см), так и из алюминия ($\rho_1 = 2{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ом · см).

Таблица 2

Оптимальные толщины токоведущего проводника

Число слоев	Проводник из меди			Проводник из алюминия		
	Толщина, мм	КПД	Cos φ	Толщина, мм	КПД	Cos φ
1	15,7	0,565	0,317	18,6	0,541	0,316
2	11,2	0,588	0,290	15,2	0,563	0,285
3	9,6	0,617	0,265	12,5	0,584	0,258
4	8,8	0,638	0,240	10,5	0,604	0,238
5	8,0	0,655	0,221	9,2	0,621	0,221
6	7,2	0,669	0,208	8,6	0,634	0,205
7	6,9	0,678	0,193	8,0	0,644	0,192

Для сравнения энергетических показателей проведены расчеты индукционных систем для нагрева алюминиевого цилиндра длиной 1 м и диаметром 0,3 м ($\rho_2 = 5{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом · см). Полная длина индуктора – 1 м. Зазор между загрузкой и внутренним слоем индуктора – 0,02 м. Анализ данных, приведенных в табл. 1, 2, позволяет сделать следующие выводы:

– многослойные индукторы с обмотками из токоведущих проводников оптимальной толщины имеют КПД, заметно превышающий КПД однослойного индуктора;

– чем больше число слоев, тем выше электрический КПД индуктора;

– изготовить трубки из меди с оптимальной толщиной для шестислойного и семислойного индуктора невозможно;

– КПД шестислойного и семислойного индуктора из медной трубки с толщиной 0,8 см снижается по сравнению с пятислойным индуктором;

– КПД семислойного индуктора из алюминиевого провода толщиной 0,8 см практически тот же, что и пятислойного из медной трубки (при разнице в 1,5 %).

Для металлов нагрев сопровождается возрастанием удельного электрического сопротивления, поэтому на практике часто применяется принудительное охлаждение индуктора (воздушное или водяное) [13], а для специальных задач может быть ис-

пользовано криогенное охлаждение с применением конденсированных газов, например, жидких азота и водорода.

Использование криорезистивного эффекта открывает большие возможности снижения электрических потерь в индукторах. Он заключается в значительном снижении удельного электрического сопротивления чистых металлов при криогенных температурах.

Криогенное охлаждение обмотки индуктора, изготовленного из сверхчистого металла (медь, алюминий, бериллий), позволяет достичь значений $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-9}$ Ом · м (при $T = 77$ К) и даже $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-11}$ Ом · м (при $T = 20$ К). Криорезистивные проводники могут работать в сильных переменных электромагнитных полях, а затраты энергии на поддержание указанных значений криогенных температур в ряде случаев могут оказаться приемлемыми.

Применение криоохлаждения в сочетании с многослойными обмотками индуктора обеспечивает еще более эффективное снижение электрических потерь. При этом по сравнению с водоохлаждаемыми индукторами появляется возможность существенного уменьшения толщины слоев обмотки и зазоров для охлаждающей среды, что позволяет увеличить число слоев индуктора при малых радиальных размерах многослойной обмотки.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают [14], [15], что потери в многослойном криорезистивном индукторе по сравнению с обычным однослойным водоохлаждаемым могут быть снижены в 10–15 раз при охлаждении конденсированным азотом ($T = 77$ К) и в 120–160 раз – при охлаждении неоном ($T = 27$ К) или водородом ($T = 20$ К). С учетом потребления энергии криогенным оборудованием и его стоимости криоохлаждаемые индукторы целесообразно применять в мощных индукционных установках (мощностью свыше 1 МВт), а также при групповой установке индукционных устройств с большой суммарной мощностью. Однако в этом случае электроизоляционные детали и элементы установок работают в условиях резкого, часто термоударного охлаждения с последующим разогревом, причем этот процесс является многократным. Это выдвигает проблему изучения поведения электроизоляционных материалов (керамика, полимеры) в условиях термоударного охлаждения.

Оценивая возможность использования криогенного охлаждения индукторов в устройствах индукционного нагрева ферромагнитной стали, следует отметить, что отдельные устройства достигают мощностей порядка нескольких мегаватт, например, в установках для выгрузки смерзшегося угля из полувагонов. При этом необходимо учитывать сопутствующие факторы, как, например, наличие на предприятии криогенных воздухоразделительных установок, которые могут существенно улучшать экономические показатели внедрения криорезисторных индукционных устройств.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы и определить пути повышения эффективности работы индукционных нагревательных установок:

– в однослойном индукторе, в отличие от многослойного, радиальное распределение плотности тока по сечению проводника крайне неравномерно;

– в многослойных конструкциях происходит увеличение эффективного поперечного сечения проводника путем выравнивания в нем плотности тока, что ведет к снижению потерь активной мощности в 2,5–3,0 раза по сравнению с однослойными конструкциями;

– охлаждение многослойных обмоток индуктора, выполненных из сверхчистых металлов (алюминия, меди, бериллия), до криогенных температур 80–20 К ведет к снижению их удельного электрического сопротивления в 10–1000 раз, что также значительно снижает потери активной мощности;

– важной проблемой при проектировании криорезистивных индукторов является обеспечение механической прочности и стабильности электрических свойств электроизоляционных материалов (керамика, полимеры) в условиях термоударного охлаждения.

Применение подобных мероприятий позволит добиться увеличения КПД системы «индуктор–загрузка» до значений 0,90–0,95 и существенно повысить их эффективность.

Литература

1. Установки индукционного нагрева : учеб. пособие для вузов / под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. Демидович, В. Б. Расчет цилиндрического индуктора с немагнитной загрузкой на ЭВМ / В. Б. Демидович, В. С. Немков // Промышленное применение токов высокой частоты : сб. науч. тр. ВНИИТВЧ. – Л. : Машиностроение, 1975. – Вып. 15. – С. 38–45.
3. Немков, В. С. Индукционный нагрев цилиндрических оболочек с произвольной толщиной стенки / В. С. Немков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1979. – № 3. – С. 109–114.
4. Немков, В. С. Математическое моделирование на ЭВМ устройств высокочастотного нагрева / В. С. Немков, Б. С. Полеводов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 173 с.
5. Шамов, А. Н. Высокочастотная сварка металлов / А. Н. Шамов, И. В. Лунин, В. Н. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1977. – 220 с.
6. Тир, Л. Л. Современные методы индукционной плавки / Л. Л. Тир, Н. И. Фомин // Б-ка электротермиста. – М. : Энергия, 1975. – Вып. 59. – 89 с.
7. Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия / В. Б. Демидович [и др.] // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2001. – № 2. – С. 53–59.
8. Энергоэффективный индукционный нагрев алюминиевых заготовок перед прессованием / В. С. Немков [и др.] // Индукционный нагрев. – 2012. – № 3 (21). – С. 10–15.
9. Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева / В. Б. Демидович [и др.] // Индукционный нагрев. – 2012. – № 3 (21). – С. 26–30.
10. Влияние конструкции и режимов работы индукционных нагревателей на их энергетические показатели // В. С. Немков [и др.] // Электротехника. – 1986. – № 3. – С. 23–25.
11. Немков, В. С. Теория и расчет цилиндрических электромагнитных систем индукционного нагрева : дис. … д-ра техн. наук : 05.09.10 / В. С. Немков ; ЛПИ – Л., 1979. – 326 с.
12. Harvey, J. G. The theory of multy-layed windings for induction heating and their application to a 1 MW 50 Hz longitudinal flux billet heater / J. G. Harvey // VIII Congress UIE. – Liege, 1976. – № 4. – S.1la.

13. Шевцов, М. С. Развитие электротермической техники / М. С. Шевцов, А. С. Бородачев. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
14. Перспективы применения криогенной техники в электротермии / В. А. Григорьев [и др.] // Электротехн. пром-ть. – 1980. – № 1. – С. 9–11.
15. Ижикова, А. Д. Индукторы с самокомпенсацией реактивной мощности систем электроснабжения электротехнологического назначения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. Д. Ижикова ; ЮУГУ. – Челябинск, 2007. – 24 с.

Получено 02.10.2015 г.