ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ КАК НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

А. В. Берсенев

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск

Научный руководитель А. И. Зеленькевич

Рассмотрены особенности функционирования вакуумных индукционных печей с точки зрения их влияния на качество электроэнергии. Приведен анализ электрических характеристик печи как нелинейного приемника, описаны процессы, вызывающие появление гармонических искажений в питающей сети, и возможные пути их компенсации. Отмечена роль тиристорных преобразователей частоты в формировании спектра токов высших гармоник и предложены общие рекомендации по повышению энергоэффективности и электромагнитной совместимости таких установок.

Ключевые слова: вакуумная индукционная печь, нелинейная нагрузка, гармоники, тиристорный преобразователь частоты, качество электроэнергии.

Термическая обработка в вакууме и методы вакуумной плавки в настоящее время достаточно широко применяются для создания материалов, получение которых другим способом достаточно проблематично. Плавка в вакууме позволяет предохранять расплавляемый металл от взаимодействия с окружающей средой. Вакуумирование плавильного пространства позволяет значительно улучшить механические и литейные свойства высоколегированных сталей, специальных сплавов, которые из-за наличия легкоокисляемых элементов склонны к образованию значительного количества оксидных пленок. При вакуумной плавке концентрация примесей в жидком металле понижается за счет прохождения такого процесса, как, например, дегазация, если концентрация газов, растворенных в металле, зависит от давления окружающей среды.

Вакуумная печь для индукционной плавки (ВИП) − это система, включающая в себя герметичную камеру, в которой устанавливаются индукционная тигельная печь и в ряде случаев литейная форма [1]. Следует отметить, что в последнее время в мировом литейном производстве отмечается тенденция получения высокотехнологичных легированных материалов. В такое производство в мировом масштабе инвестируется все больше капитальных вложений. Поэтому основополагающий процесс для большинства всех производителей высоколегированных сплавов – вакуумная индукционная плавка, которая особенно хорошо подходит для плавки и получения литья из железа, черных металлов, никеля, кобальта и их сплавов в вакууме и контролируемой атмосфере для удовлетворения требований промышленного производства. Когда качество материала чрезвычайно важно, конструкция вакуумных печей для индукционной плавки и литья позволяет легко и быстро достигать необходимых результатов, обеспечивая заказчиков продукцией необходимого качества.

При всех своих технологических преимуществах у ВИП есть и существенные недостатки с точки зрения влияния на качество электроэнергии в точке присоединения с электрической сети. Цель данного исследования – изучить особенности электрических параметров вакуумной индукционной печи, анализируя ее как нелинейную нагрузку, и определить влияние факторов на работу системы.

Рассмотрим особенности работы вакуумной индукционной печи как нелинейной нагрузки. В процессе плавления металл меняет свои магнитные и электрические свойства, из-за чего активное сопротивление нагрузки нелинейно зависит от темпе-

ратуры. Также вакуумная индукционная печь является нелинейной нагрузкой из-за использования силовых преобразователей частоты (тиристорных/транзисторных), что вызывает гармонические искажения тока и напряжения. Тиристорный инвертор токового типа обладает свойством прерывистого протекания тока, зависящего от угла управления. При изменении нагрузки, особенно в динамических режимах плавки, угол открытия тиристоров варьируется, и форма токовой кривой искажается. В цепи появляются гармоники 5-й, 7-й, 11-й и более высоких порядков, сумма которых формирует результирующую несинусоидальную форму сигнала.

Исследования показывают, что высокое содержание гармоник приводит к нагреву трансформаторов, снижению срока службы конденсаторных установок и возрастанию потерь в линиях. Особенно чувствительны к этому автономные или ослабленные сети, характерные для промышленных предприятий.

Дополнительным фактором является емкостное и индуктивное взаимодействие элементов в контуре печи, так как колебательная цепь может вступать в резонанс с высшими гармониками, усиливая блуждающие токи и создавая дополнительные помехи. В условиях вакуумной плавки, где требования к надежности и стабильности питания высоки, эти эффекты требуют особого внимания.

Моделирование в *MATLAB/Simulink* и специализированные пакеты моделирования (*Micro-Cap*, *PSpice*) позволяют оценить влияние изменения параметров нагрузки и настроек преобразователя на форму токов и напряжений, а также подобрать оптимальные схемы фильтрации и стабилизации.

Одним из направлений повышения стабильности работы печей является параметрическая стабилизация мощности индуктора, основанная на адаптивном управлении контуром в зависимости от изменения электрических свойств расплава.

Элементы активной фильтрации и компенсационные устройства позволяют снизить уровень гармоник и улучшить электромагнитную совместимость с сетью. Комбинирование *LC*-фильтров с системами активной компенсации реактивной мощности (*STATCOM*, *AQC*) обеспечивает наиболее устойчивый результат при работе мощных индукционных установок.

Для уменьшения негативного влияния вакуумных индукционных печей на энергосистему целесообразно: применять тиристорные преобразователи с мягким коммутационным режимом, снижающим переключательные перенапряжения; использовать активные фильтры и управляемые компенсаторы реактивной мощности для подавления гармоник; обеспечивать согласование мощности печей с трансформаторами через согласующие реакторы; в качестве способа регулирования мощности печи использовать частотно-импульсную модуляцию выходного напряжения.

Известно, что последовательный резонансный контур потребляет из источника максимум мощности при частотах, близких к его резонансной частоте. Принцип регулирования строится на том, что при уходе в сторону от резонансной частоты растет импеданс контура, вследствие чего он потребляет меньшую мощность. Для тиристорных преобразователей частоты используется регулирование в области частот ниже резонансной, ведь они и так работают на предельных частотах, в то время как для транзисторных преобразователей допустимо регулирование в области частот выше резонансной. При частотах выше резонансной транзистор включается до достижения током нулевого значения, когда его обратный диод является проводящим. Подобное включение является благоприятным для транзистора, ведь не возникает сквозных токов через открывающийся транзистор и обратный диод [2].

Также целесообразно внедрять интеллектуальные системы мониторинга качества электроэнергии, которые позволяют в режиме реального времени контролировать коэффициент искажения тока (*THD*) и использовать цифровые регуляторы мощности, поддерживающие оптимальный ток в индукторе при изменении свойств расплава.

Комплексное применение указанных мер позволяет не только обеспечить нормативное качество электроэнергии, но и продлить срок службы силового оборудования.

С целью выявления закономерности изменения спектра гармоник в зависимости от мощности и режимов работы, что позволит оптимизировать параметры управления для минимизации искажений, на одном из производственных предприятий г. Барановичи планируется проведение исследований работы вакуумных индукционных печей типа 791 марки TAV (рис. 1). Данный тип закалочного оборудования может использоваться в качестве плавильной печи при условии использования плавильного тигля и литейной формы.



Рис. 1. Вакуумная печь тип 791 марки TAV для термообработки различных изделий из металла

В ходе исследований планируется установить характер нелинейности вакуумной индукционной печи, уровни и спектр эмиссии гармоник токов и искажений напряжений при различных режимах нагрева.

Вакуумная индукционная печь представляет собой сложный электрофизический объект, сочетающий высокоточные технологические процессы и существенное воздействие на энергосистему. Повышение эффективности функционирования таких установок требует комплексного подхода: оптимизации схемных решений, применения активных фильтров и адаптивного управления мощностью. Это обеспечивает стабильность плавильного процесса, энергосбережение и электромагнитную совместимость с сетью предприятия.

Литература

1. Вакуумные индукционные плавильные печи. – URL: https://consarc.com/product_categories/vacuum-induction-melting-furnaces-vim/ (дата обращения: 03.04.2026).
2. Патент RU157187 U1, МПК H02M 5/00 (2006.01). Устройство управления перестраиваемым инвертором тока для индукционного нагрева при сильно изменяющейся нагрузке : опубл. 07.12.2017, бюл. № 34 / Кувалдин А. Б., Федин М. А., Генералов И. М., Кулешов А. О.