

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Разработка активного корректора мощности на базе топологии
'Totem Pole' и его применение в составе импульсного источника
питания**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2241 группы
направления 09.04.02 Информационные системы и технологии

Института физики

Акимовой Варвары Романовны

Научный руководитель
Доцент кафедры
радиофизики и
нелинейной динамики,
к.ф.-м.н.

К.С. Сергеев

Заведующий кафедрой
физики открытых систем,
д.ф.-м.н., профессор

А.А. Короновский

Саратов 2025 год

Введение

В настоящее время источники питания являются неотъемлемой частью большинства электронных и промышленных систем. Они обеспечивают преобразование и стабилизацию электрической энергии, позволяя различным устройствам и оборудованию работать в заданных условиях. Одной из ключевых характеристик таких источников является их энергоэффективность, которая напрямую связана с коэффициентом мощности. Низкий коэффициент мощности приводит к значительным потерям электроэнергии, перегрузке сети и повышенному энергопотреблению, что делает его коррекцию важной задачей в современных системах электропитания.

Разработка активных корректоров коэффициента мощности является актуальным направлением в области электроники и энергетики. Они позволяют минимизировать гармонические искажения и улучшить синхронизацию формы входного тока с формой напряжения сети. Среди различных схем коррекции коэффициента мощности особое внимание уделяется топологии "тотем-пол", которая обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями. Она обеспечивает минимальные потери при переключении, повышенную плотность мощности и улучшенные характеристики электромагнитной совместимости, что делает её перспективной для применения в мощных импульсных источниках питания.

Цель данной работы – анализ методов коррекции коэффициента мощности и разработка активного корректора коэффициента мощности на базе топологии "тотем-пол", применяемого в составе конвертора напряжения сети КНС-4000. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- проведение анализа существующих методов коррекции коэффициента мощности и их влияния на характеристики импульсных источников питания;

- исследование различных схем PFC, включая традиционные, безмостовые и полубезмостовые решения;
- проектирование и разработка конвертора напряжения сети КНС-4000 с использованием программного пакета Altium Designer;
- выполнение трассировки многослойной печатной платы;
- проведение испытаний устройства на нагрузочных стендах, подтверждение его рабочих параметров и эффективности топологии "тотем-пол";
- тестирование источника вторичного электропитания ИВЭП-10000, включающего модули КНС-4000, для анализа надежности работы системы.

Работа включает две основные главы:

- Первая глава посвящена теоретическому анализу коэффициента мощности, методам его коррекции, различным схемам реализации PFC, а также рассмотрению особенностей работы топологии "тотем-пол".
- Вторая глава представляет собой практическую часть, включающую разработку конвертора напряжения сети КНС-4000, его схемотехническое проектирование, моделирование, трассировку печатной платы и проведение испытаний, а также анализ работы источника вторичного электропитания ИВЭП-10000.

Научная новизна работы заключается в изучении особенностей применения топологии "тотем-пол" в мощных импульсных источниках питания и проведении комплексных испытаний разработанного корректора коэффициента мощности в составе конвертера напряжения сети КНС-4000. Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для проектирования надежных и

эффективных систем электропитания, применяемых в промышленных и технологических комплексах.

Основная часть

Исследование посвящено разработке активного корректора коэффициента мощности для импульсных источников питания, применяемых в системах электрохимической защиты. Работа включает изучение принципов функционирования коррекции коэффициента мощности, анализ различных схем реализации корректоров, а также проектирование и тестирование конвертора напряжения сети КНС-4000 на базе топологии "тотем-пол" – импульсного источника питания мощностью 4000 Вт.

Основным принципом работы импульсных источников питания является преобразование электрической энергии с целью стабилизации выходного напряжения и минимизации потерь мощности. В таких устройствах важным параметром является коэффициент мощности, характеризующий уровень эффективности потребления электроэнергии. Низкий коэффициент мощности приводит к снижению эффективности работы системы и увеличению нагрузок на сеть, что требует применения корректоров коэффициента мощности.

Коррекция коэффициента мощности играет ключевую роль в повышении эффективности импульсных источников питания. В идеальных условиях коэффициент мощности равен единице, однако нелинейные нагрузки вводят гармонические искажения, что снижает его значение. В данном исследовании рассматриваются методы коррекции коэффициента мощности.

Управление коэффициентом мощности выполняется двумя основными методами: пассивным и активным. Пассивные корректоры используют индуктивные и емкостные элементы для стабилизации формы потребляемого тока, однако они обладают ограниченной эффективностью. Активные корректоры коэффициента мощности динамически изменяют параметры входного тока, синхронизируя его с сетевым напряжением, что позволяет минимизировать потери энергии и улучшить характеристики электропитания [1-2].

Среди различных схем реализации корректоров мощности выделяются несколько ключевых топологий, применяемых для усилителей PFC в преобразователях AC-DC. Традиционный усилитель PFC использует диодный мост и повышающий преобразователь, но характеризуется высокими потерями на проводимость. Безмостовой PFC снижает потери, однако требует сложных решений для управления переключением. Полубезмостовой корректор мощности снижает уровень электромагнитных помех, но увеличивает габариты устройства [3].

Особое внимание в исследовании уделено топологии "тотем-пол". Данный тип корректора коэффициента мощности минимизирует переключательные потери и повышает плотность мощности, что делает его перспективным решением для систем импульсного электропитания [3]. В данной работе проведен анализ его работы, рассмотрены преимущества и возможные ограничения данной схемы.

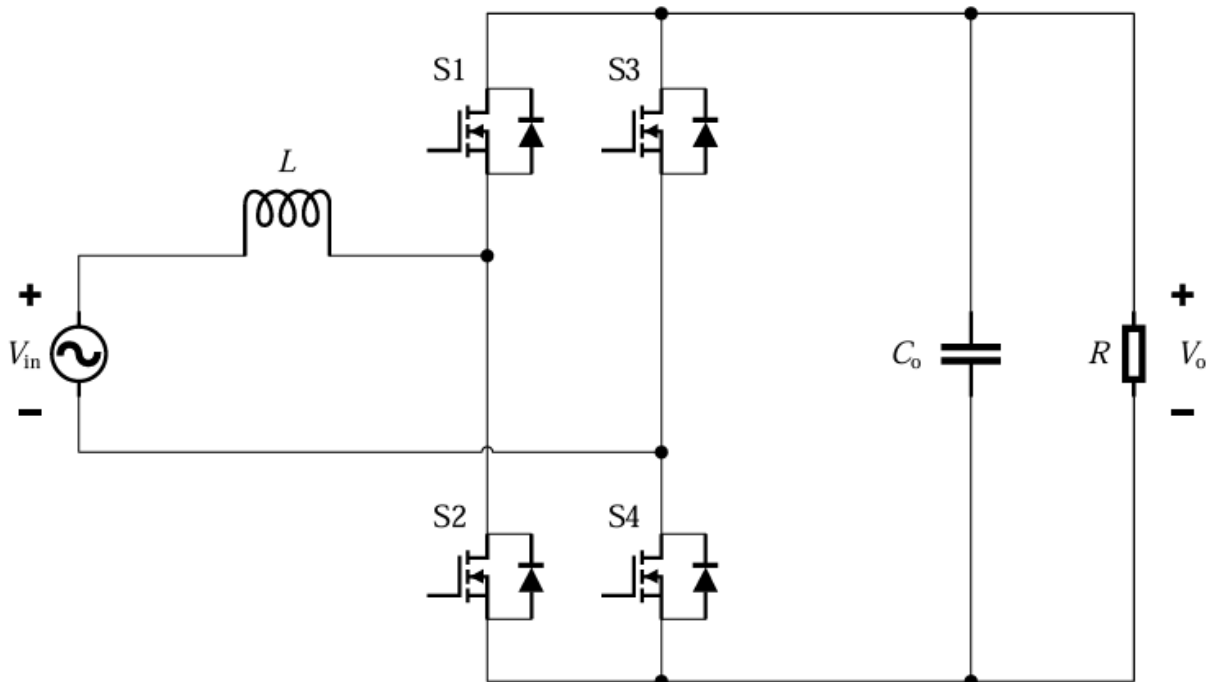


Рисунок 1. PFC «тотем-пол» с выпрямителем MOSFET.

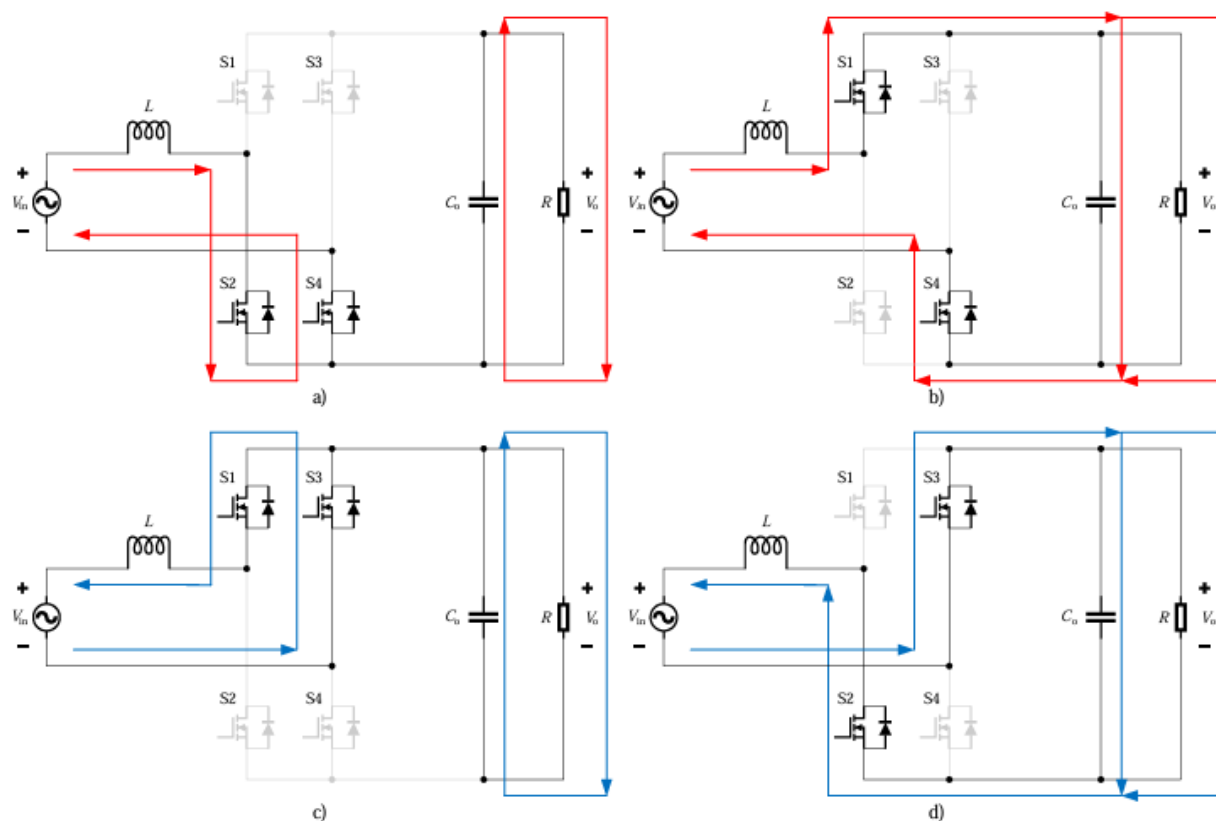


Рисунок 2. Режимы PFC «тотем-пол» в положительном полупериоде (a, b) и отрицательном полупериоде (c, d).

Режим работы переключающих элементов оказывает значительное влияние на эффективность корректоров мощности. Жесткое переключение приводит к значительным потерям энергии и увеличению уровня электромагнитных помех, тогда как мягкое переключение снижает потери и повышает общую энергоэффективность системы [4-5].

В исследовании рассмотрены три режима проводимости корректоров коэффициента мощности. Режим непрерывной проводимости характеризуется минимальными пульсациями тока, но требует повышенного внимания к потерям при включении. Режим разрывной проводимости отличается высокими пульсациями, но снижает потери при включении. Критический режим проводимости представляет собой компромисс между двумя вышеописанными методами, позволяя повысить плотность мощности и уменьшить потери.

Практическая часть работы посвящена проектированию, разработке и испытаниям конвертора напряжения сети КНС-4000, основанного на топологии "тотем-пол". В рамках исследования была выполнена схемотехническая разработка устройства, проведена трассировка многослойной платы и выполнены комплексные испытания в различных режимах эксплуатации.

Конвертор напряжения сети КНС-4000 предназначен для питания аппаратуры специализированных программно-технических комплексов. Он обеспечивает стабилизацию выходного напряжения и коррекцию коэффициента мощности. В ходе работы был разработан принципиальный проект устройства, охватывающий как электрическую схему, так и конструктивные особенности, включая тепловые и электромагнитные характеристики.

Разработка КНС-4000 включала использование программного пакета Altium Designer, что позволило выполнить трассировку восьмислойной печатной платы, рассчитать и снизить паразитные параметры, повысить надежность работы устройства. Созданная трехмерная модель платы предоставила возможность визуализировать компоновку элементов и оптимизировать размещение компонентов с учетом теплоотведения и минимизации уровня электромагнитных помех.

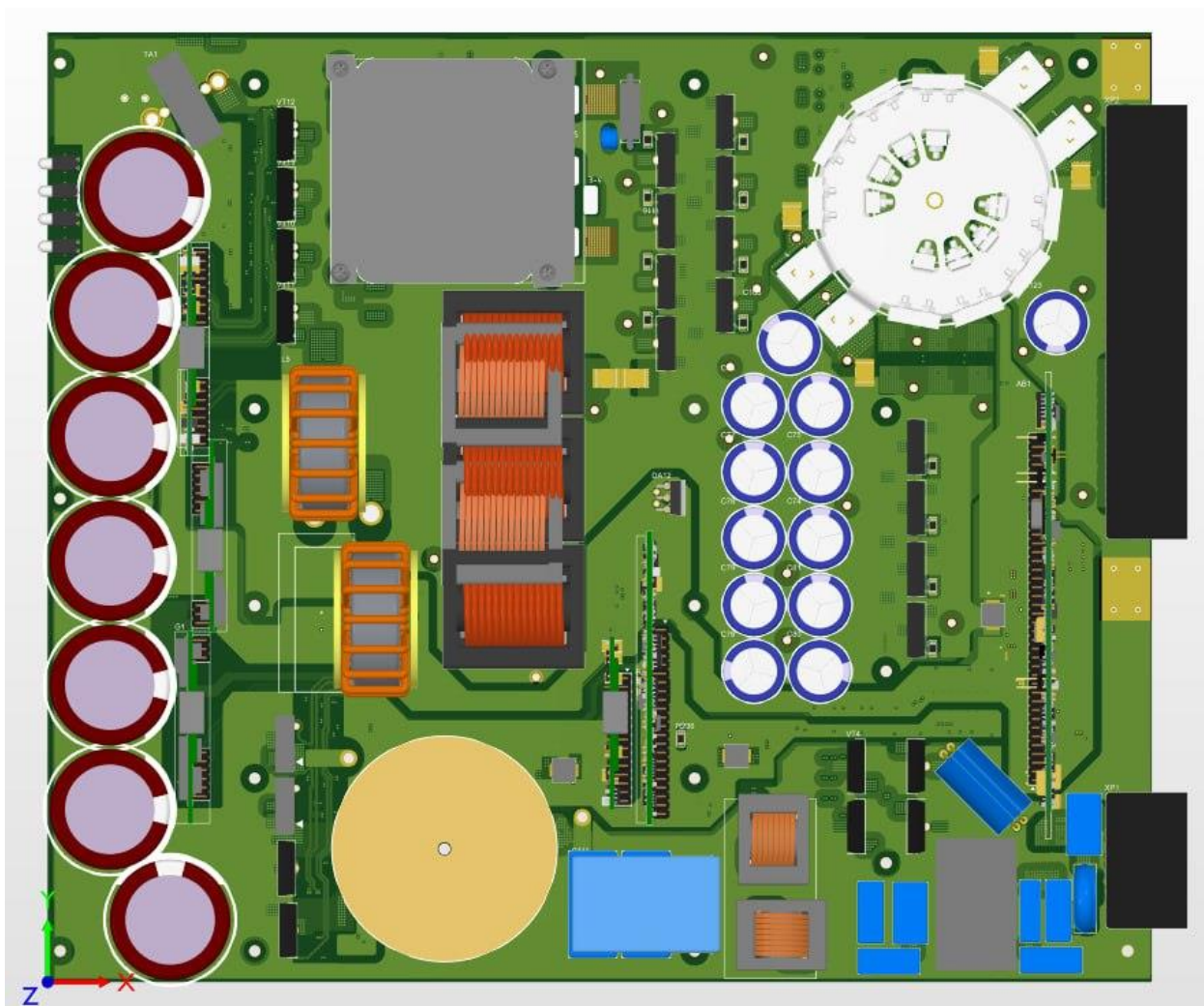


Рисунок 3. Лицевая сторона трехмерной модели конвертора напряжения сети КНС 4000.

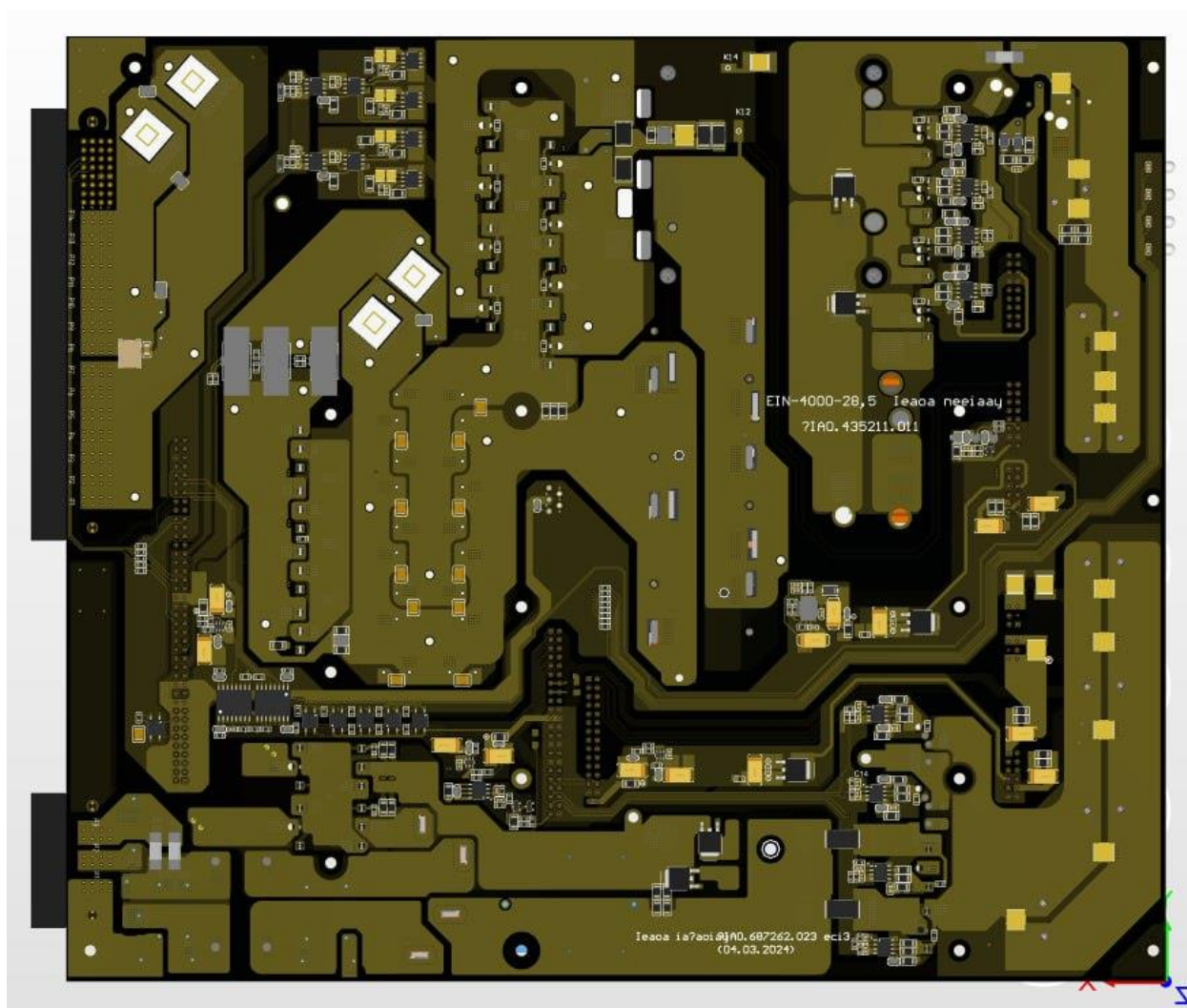


Рисунок 24. Обратная сторона трехмерной модели конвертора напряжения сети КНС 4000.

Для подтверждения работоспособности устройства был разработан и собран нагрузочный стенд для испытаний мощностью до 6 кВт. Он позволил провести анализ параметров работы КНС-4000 при различных нагрузках, оценить качество стабилизации выходного напряжения и подтвердить соответствие заявленным характеристикам.

Дополнительно в рамках работы рассмотрен источник вторичного электропитания ИВЭП-10000, который включает в себя три конвертора

напряжения сети КНС-4000. Проведены его испытания на специально разработанном и собранном нагрузочном стенде мощностью до 15 кВт, что позволило проверить надежность системы и оценить эффективность ее работы в различных режимах. Полученные результаты показали, что устройства демонстрируют надежную работу в различных режимах эксплуатации.



Рисунок 5. Изображение ИВЭП 10000, общий вид.

Заключение

Проведенное исследование было посвящено анализу методов коррекции коэффициента мощности в импульсных источниках питания и разработке активного корректора коэффициента мощности на базе топологии "тотем-пол". Основное внимание уделялось изучению особенностей работы различных схем PFC, сравнительному анализу их эффективности, а также разработке и тестированию конвертора напряжения сети КНС-4000.

В рамках работы рассмотрены теоретические аспекты коррекции коэффициента мощности, включая анализ пассивных и активных методов, влияние гармонических искажений на работу системы и способы их минимизации. Был проведен сравнительный анализ известных топологий PFC, таких как традиционный усилитель, безмостовая и полубезмостовая схемы, а также подробно изучена работа преобразователя "тотем-пол".

Практическая часть включала проектирование КНС-4000, выполнение трассировки многослойной печатной платы и последующее тестирование устройства. Испытания устройства на нагрузочном стенде мощностью до 6 кВт подтвердили его работоспособность и соответствие заявленным характеристикам.

Дополнительно были проведены испытания источника вторичного электропитания ИВЭП-10000, включающего три модуля КНС-4000. Тестирование на нагрузочном стенде мощностью до 15 кВт позволило проверить стабильность выходного напряжения, работу встроенного корректора коэффициента мощности и надежность системы при различных режимах эксплуатации.

Полученные результаты подтвердили эффективность применения топологии "тотем-пол" в мощных импульсных источниках питания. Испытания показали высокую стабильность работы устройства, соответствие

техническим требованиям и возможность дальнейшего применения разработанной системы в промышленных и технологических комплексах.

Список источников

1. Toshiba, Power Factor Correction (PFC) Circuits, 2019.
2. McDonald Brent, Lough Brent, 2020, Power Factor Correction (PFC) Circuit Basics.
3. Chellappan Salil, 2018, A comparative analysis of topologies for a bridgeless-boost PFC circuit, Analog Design Journal.
4. Edmunds Mark, Hard Switching vs Soft Switching: A Case Study.
5. Infineon Technologies, 2019, CoolMOS™ SJ MOSFETs benefits in hard and soft switching SMPS topologies.
6. Abdel-Rahman Sam, Stückler Franz, Siu Ken, 2016, PFC boost converter design guide.
7. H. Zhou, W. Liu and E. Persson, "Evaluation of TCM and CrCM modulation for Totem Pole PFC," PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2016, pp. 1-7.
8. C. R. Sullivan and R. Y. Zhang, "Simplified design method for litz wire," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 2667-2674, doi: 10.1109/APEC.2014.6803681.
9. Infineon Technologies, IGI60F140A1L.
10. Infineon Technologies, Wide Bandgap Semiconductors (SiC/GaN).
11. Infineon Technologies, 2017, XMC1400 Microcontroller Datasheet.
12. Infineon Technologies, 2018, IPL60R065P7 Datasheet.
13. Plexim, PLECS The Simulation Platform for Power Electronic Systems.
14. Q. Huang and A. Q. Huang, "Review of GaN totem-pole bridgeless PFC," in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 3, pp. 187-196, Sept. 2017, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2017.00018.
15. TDK, 2023, SIFERRIT material N49 Datasheet.

16. Xu Tang and C. R. Sullivan, "Stranded wire with uninsulated strands as a low-cost alternative to litz wire," IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03., Acapulco, Mexico, 2003, pp. 289-295 vol.1, doi: 10.1109/PESC.2003.1218308.
17. Liu Tian-Hua, Hsu Chih-Pin, Wang Shao-Ming, Song Yu-Cheng, "Design and implementation of power factor corrected circuits without using inductor-current sensors," IET Power Electronics, 2023. DOI: 10.1049/pel2.12520.
18. Swagatam, "Power Factor Correction (PFC) Circuit – Tutorial," Homemade Circuit Projects, 2024.
19. Malviya Anamika, Pandey Pawan, "Active Power Factor Correction of Single-Phase Using Boost Converter Control," International Journal of Scientific and High Research in Engineering, vol. 11, issue 8, August 2023, pp. 24-32.
20. Abdel-Rahman Sam, Fontana Nico, "CoolSiC™ totem-pole PFC design guide and power loss modeling," Infineon Technologies, 2023.
21. Texas Instruments, "GaN-Based 5kW Two-Phase Totem-Pole PFC Reference Design with Zero Current Detection," PMP23475, 2023.
22. Maurizio Di Paolo Emilio, "GaN, SiC, PCIM 2023: Power Electronics Week Insights," Power Electronics News, May 2023.
23. Menzi David, Kolar Johann W., Sarnago Héctor, Lucía Óscar, Huber Jonas E., "New 600V GaN Single-Stage Isolated Bidirectional 400V Input Three-Phase PFC Rectifier," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2023.
24. Maurizio Di Paolo Emilio, "GaN & SiC: Design, Devices and the Evolving Market," EE Times, September 2023.