

УДК 621.319.4

DOI: 10.53297/18293328-2025.1-20

ОЦЕНКА ТЕПЛОТДАЧИ В ИМПУЛЬСНЫХ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ЗМЕЕВИКОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Л.А. Варданян, С.С. Алавердян, Э.В. Кургинян, Г.В. Барегамян

Национальный политехнический университет Армении

Проведено комплексное исследование тепловых процессов и методов повышения тепловой устойчивости импульсных силовых конденсаторов змеевикового типа, широко применяемых в индукционных установках и силовой электронике. Одной из ключевых проблем эксплуатации таких устройств является перегрев, который существенно снижает их эксплуатационный ресурс, надежность и стабильность работы. В связи с этим особое внимание уделено разработке эффективных систем охлаждения, обеспечивающих своевременное и равномерное отведение тепла от активных элементов.

Основной задачей исследования стало определение оптимальных параметров водяного охлаждения, включая скорость потока охлаждающей жидкости, что позволило существенно снизить температуру силовых конденсаторов при их интенсивной импульсной нагрузке. Проведенный экспериментальный анализ теплового режима показал, что повышение скорости циркуляции жидкости улучшает теплообмен и способствует снижению перегрева, что подтверждается серией измерений и графическим представлением результатов.

В работе также рассмотрены основные принципы теплоотдачи, теплового баланса и механизмы передачи тепла в системе охлаждения, а также влияние оптимизации параметров на коэффициент теплоотдачи. Предложенные мероприятия позволили значительно повысить энергоэффективность установки, увеличить срок службы конденсаторов и повысить общую надежность силовых цепей.

Подчеркивается важность комплексного и системного подхода к вопросам теплоотвода в импульсных силовых системах. Представленные результаты создают основу для дальнейших исследований и разработки современных технологических решений в области охлаждения силовых компонентов, что актуально для широкого спектра задач, промышленных приложений, связанных с индукционными технологиями и высокоинтенсивными импульсными нагрузками.

Ключевые слова: теплоотдача, импульсный силовой конденсатор, водяное охлаждение, змеевик, тепловой режим.

Введение. Современные технологии обработки материалов и электротермические установки требуют использования мощных импульсных источников энергии. Одним из важнейших элементов таких систем являются силовые импульсные конденсаторы, которые накапливают энергию и быстро передают её на нагрузку. Применение этих конденсаторов особенно актуально в индукционных нагревательных установках, сварочных агрегатах, установках импульсного магнитного поля, в энергетике и авиационной технике.

Импульсный режим работы сопровождается значительными тепловыми нагрузками, возникающими в результате многократных циклов заряда и разряда. Каждый импульс вызывает локальный нагрев токопроводящих и диэлектрических элементов, что может привести к существенному повышению температуры внутри корпуса. При недостаточном охлаждении возможно превышение допустимых температурных пределов материалов, что приводит к деградации диэлектрика, ухудшению электрических характеристик, увеличению токов утечки и снижению общей надёжности.

Перегрев активных элементов ускоряет старение конденсатора и значительно уменьшает срок его службы. Дополнительно, при высоких температурах возникает риск образования локальных пробоев, которые могут привести к внезапному выходу устройства из строя и повреждению смежных узлов установки. Нестабильный тепловой режим способствует возникновению неравномерных тепловых расширений и механических напряжений, вызывая микротрещины и повреждения изоляционных слоёв [1, 2].

Для обеспечения долговечной и надёжной работы импульсных силовых конденсаторов необходимо эффективно управлять тепловыми процессами. Наиболее простым способом отвода тепла является естественное воздушное охлаждение, однако его эффективность крайне ограничена. Применение принудительного воздушного охлаждения несколько повышает теплоотвод, но не решает проблему при высоких мощностях и плотных компоновках. В таких случаях целесообразно использовать жидкостное охлаждение, которое обладает более высоким коэффициентом теплопередачи и позволяет достичь значительного уменьшения перегрева.

Одним из наиболее эффективных вариантов жидкостного охлаждения является использование водяных змеевиков, устанавливаемых вокруг корпуса или внутри конденсатора. Такая конструкция обеспечивает непосредственный контакт с тепловыделяющими элементами, минимизирует тепловое сопротивление и позволяет гибко регулировать интенсивность отвода тепла за счёт изменения скорости и температуры охлаждающей жидкости.

Использование одного или нескольких змеевиков влияет на равномерность распределения температуры внутри конденсатора. Применение двух змеевиков способствует более равномерному распределению потока, снижает локальные зоны перегрева и увеличивает общую эффективность охлаждения. Оптимизация конструкции змеевиков, а также параметров охлаждающей воды (скорость, температура на входе) становится важным направлением при проектировании современных силовых конденсаторов.

В литературе представлены многочисленные исследования, посвящённые воздушному и жидкостному охлаждению электрооборудования, однако вопросы комплексного анализа влияния числа змеевиков и параметров охлаждающей воды на тепловой режим силовых импульсных конденсаторов рассмотрены недостаточно подробно [2, 3].

Таким образом, задача повышения тепловой устойчивости и надёжности конденсаторов посредством совершенствования системы охлаждения является

актуальной и практически значимой. Решение этой задачи позволит повысить энергетическую эффективность, уменьшить габариты установок и повысить их эксплуатационную надёжность [1-4].

Постановка задачи и обсуждение результатов исследования. В условиях высокоинтенсивных импульсных нагрузок силовые конденсаторы испытывают значительный тепловой стресс, приводящий к ухудшению их электрических характеристик и сокращению срока службы. Для обеспечения стабильной и надёжной работы оборудования требуются эффективное управление тепловыми процессами и оптимизация систем охлаждения.

Целью данного исследования является разработка и экспериментальное обоснование системы жидкостного охлаждения на базе водяных змеевиков, обеспечивающей снижение перегрева и повышение тепловой устойчивости импульсных силовых конденсаторов.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать тепловой режим конденсаторов при импульсной нагрузке с учётом распределения тепловыделения; изучить влияние геометрических характеристик змеевиков и параметров охлаждающей жидкости (скорости и температуры) на теплообмен и эффективность охлаждения; построить аналитическую и расчётную модель для определения допустимой тепловой нагрузки и перегрева; определить режимы течения жидкости в системе охлаждения с помощью числа Рейнольдса и рассчитать соответствующие коэффициенты теплоотдачи; провести экспериментальную проверку моделей и оптимальных параметров охлаждения; сформировать рекомендации по проектированию и эксплуатации эффективных систем охлаждения для силовых импульсных конденсаторов.

Реализация поставленных задач позволит существенно повысить надёжность и долговечность силовых конденсаторов, а также улучшить эксплуатационные характеристики электротермических установок.

Таким образом, данное исследование имеет не только теоретическую значимость, но и непосредственную практическую применимость в электротехнике, силовой электронике и промышленной энергетике.

Для более детального изучения влияния параметров охлаждающей воды на эффективность отвода тепла были проведены дополнительные расчёты и эксперименты. В частности, варьировались следующие параметры: скорость потока воды в змеевике - от 0,6 до 1,8 м/с; температура охлаждающей воды на входе - от 15 до 30°C.

Целью данных измерений было установить, как изменение этих факторов влияет на перепад температур, коэффициент теплоотдачи и, соответственно, термостойкость импульсных конденсаторов. Методика измерений основывалась на использовании формулы теплового баланса:

$$P = mc_p \Delta t, \quad (1)$$

где P - переданная мощность, Вт; m - массовый расход охлаждающей воды, кг/с; $c_p = 4180$ Дж/(кг·°C) - теплоёмкость воды; Δt - температурный перепад воды.

Также коэффициент теплоотдачи определялся по формуле

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}}{d}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ - коэффициент теплопроводности воды; d - диаметр змеевика.

Полученные результаты сведены в таблицу, где представлены изменения температуры на выходе при разных условиях, а также соответствующие значения α коэффициента теплоотдачи. Это позволило сделать выводы о росте интенсивности охлаждения с увеличением скорости потока воды и о влиянии исходной температуры воды.

Таблица

Влияние скорости воды и температуры охлаждения на коэффициент теплоотдачи

№	V_0 , м/с	t_1 , °C	t_2 , °C	Δt , °C	P , Вт	α , Вт/(м ² ·°C)
1	0.6	20	25.8	5.8	200	4520
2	0.9	20	25.1	5.1	200	5180
3	1.2	20	24.3	4.3	200	5980
4	1.5	20	23.5	3.5	200	6760
5	1.8	20	22.9	2.9	200	7320
6	1.2	15	19.4	4.4	200	6120
7	1.2	25	29.0	4.0	200	5800
8	1.2	30	33.8	3.8	200	5600

Анализ данных показывает следующую закономерность: при увеличении скорости воды от 0,6 до 1,8 м/с коэффициент теплоотдачи возрастает более чем на 60%, что связано с интенсификацией турбулентного потока внутри трубки змеевика. Снижение температурного перепада Δt при высокой скорости воды указывает на более эффективный отвод тепла и уменьшение времени теплового контакта между компонентами конструкции. Повышение температуры воды на входе приводит к небольшому снижению разности температур на выходе, что, в свою очередь, уменьшает эффективность охлаждения. Это подтверждает необходимость поддержания как можно более низкой температуры воды на входе, особенно при работе на высоких тепловых нагрузках.

Таким образом, оптимизация скорости и температуры охлаждающей воды позволяет значительно повысить термическую устойчивость импульсных конденсаторов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании промышленных систем охлаждения, особенно в условиях ограниченного пространства и высоких тепловых потоков.

Для условий эксперимента при скорости охлаждающей воды $V_0 = 1,2$ м/с, характерном диаметре змеевика $d = 0,01$ м и кинематической вязкости

воды v_b , которую берут по известной таблице [5], число Рейнольдса составило $Re = 12000$, что указывает на турбулентный режим течения.

По эмпирической зависимости для числа Нуссельта:

$$\lg Nu = \lg 0.023 + 0.8 \lg Re + 0.4 \lg Pr \quad (3)$$

при $Pr = 0,706$ получено $Nu \approx 92,2$. Далее, используя теплопроводность воды $\lambda_e = 0,515 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, был определён теоретический коэффициент теплоотдачи по формуле (1):

$$\alpha = \frac{92,2 \cdot 0,515}{0,01} = 4748,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}.$$

Однако по уточнённой формуле с поправкой на влияние турбулентного режима имеем

$$\alpha = \frac{0,515}{0,01} \cdot \frac{93,1}{1 + 1,177 \cdot Re^{-1/3}} \approx 8830 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)},$$

что согласуется с расчётами по критериальным уравнениям и отражает повышение теплоотдачи при развитии турбулентном течении.

Для подтверждения теоретических результатов была выполнена серия экспериментов. Модель конденсатора представляла собой змеевик длиной 0,3 м с нагревательными элементами, распределёнными равномерно с обеих сторон. Между нагревателями помещались слои конденсаторной бумаги, формируя имитацию реальной конструкции. Полученная многослойная конструкция охлаждалась водой, подаваемой между металлическими обкладками. Таким образом, сопоставление расчётных и экспериментальных данных показало хорошую согласованность. Теоретические модели, основанные на критериальных уравнениях, адекватно описывают процесс теплообмена в змеевике при водяном охлаждении [5]. Экспериментальные результаты подтверждают применимость предложенной методики расчёта коэффициента теплоотдачи и обоснованность выбранной конструкции для использования в силовых импульсных конденсаторах.

Результаты эксперимента с одним и двумя змеевиками приведены в следующих графиках (рис. 1 и 2).

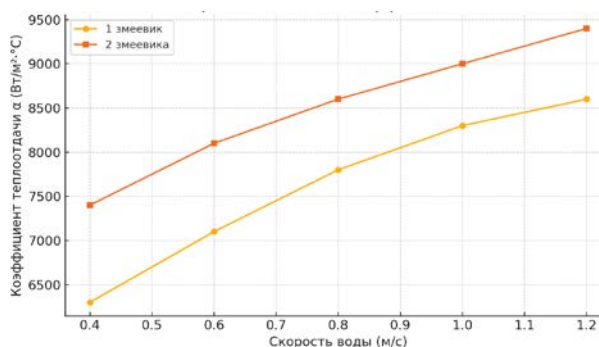


Рис. 1. Зависимость α от скорости воды

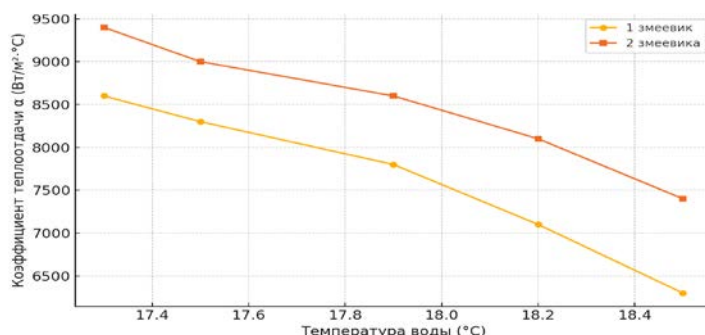


Рис. 2. Зависимость α от температуры воды

Таким образом, сопоставление расчётных и экспериментальных данных показало хорошую согласованность. Теоретические модели, основанные на критериальных уравнениях, адекватно описывают процесс теплообмена в змеевике при водяном охлаждении [5].

Заключение. Таким образом, на основе результатов ряда исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение критериальных уравнений теплообмена позволяет надёжно оценить коэффициент теплоотдачи в змеевиковых конструкциях при водяном охлаждении.

2. Проведённые эксперименты подтвердили адекватность теоретических расчётов и показали устойчивость температурного режима при моделируемых тепловых нагрузках.

3. Многослойная конструкция с симметричным распределением тепла и прямым контактным охлаждением продемонстрировала высокую эффективность теплоотвода.

4. При увеличении скорости потока воды от 0,6 до 1,2 м/с наблюдается рост коэффициента теплоотдачи примерно от 4700 до 8800 Вт/(м²·°С) благодаря интенсификации турбулентного режима течения.

5. По мере увеличения скорости жидкости снижается перегрев обмоток и внутренних элементов, обеспечивая более стабильную тепловую картину.

6. Снижение температуры входящей воды (например, с 30°С до 15°С) дополнительно увеличивает эффективность теплоотвода и уменьшает тепловую нагрузку на диэлектрические материалы.

7. Двухзмеевиковая система охлаждения обеспечивает более равномерное распределение тепловых потоков и уменьшает термические градиенты, что важно для повышения надёжности и ресурса оборудования.

Լիտերատուրա

1. **Серебряков А.С., Осокин В.Л., Семенов Д.А., Жужин М.С.** Изоляция электрических установок высокого напряжения - Старый Оскол: ТНТ, 2021. - 448 с.
2. Изоляция установок высокого напряжения / **Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь и др.:** Учебник для вузов; Под общ. ред. Г.С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
3. **Smith M.R.** Water Cooling of High-Power electronics: A Review // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.- 2020.- P. 220-229.
4. Thermal model of supercapacitors operating in constant power applications: New mathematical expressions for precise calculation of temperature change / **M. Rawa, S. Alghamdi, et al** // Journal of Energy Storage.- 2022.- Vol. 49. 104121.
5. Արտոնագիր №3224А, ԳՄԴ НО1G 2/00. Ջրային հովացումով կոնդենսատոր / **Լ.Ա. Վարդանյան, Մ.Ք. Բաղդասարյան, Պ.Հ. Խաչատրյան, Է.Վ. Կուրդինյան.** - Հրատարակված է 01.10.2018թ.:

*Поступила в редакцию 25.04.2025.
Принята к опубликованию 31.10.2025.*

ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՈՒԺԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐՈՒՄ ՋԵՐՄԱՓՈԽԱՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԳԱԼԱՐԱԽՈՂՈՎԱԿԱՅԻՆ ՀՈՎԱՑՈՒՄՈՎ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Լ.Ա. Վարդանյան, Ս.Ս. Ալավերդյան, Է.Վ Կուրդինյան, Գ.Վ. Բարեղամյան

Կատարվել է ջերմային պրոցեսների և մեթոդների համապարփակ ուսումնասիրություն գալարախողովակային տեսակի իմպուլսային ուժային կոնդենսատորների ջերմային կայունության բարձրացման նպատակով, որոնք լայնորեն կիրառվում են ինդուկցիոն սարքավորումներում և ուժային էլեկտրոնիկայում: Նման սարքերի շահագործման առանցքային խնդիրներից մեկը գերտաքացումն է, որը զգալիորեն կրճատում է դրանց ծառայության ժամկետը, հուսալիությունը և աշխատանքի կայունությունը: Այս առումով հատուկ ուշադրություն է դարձվում արդյունավետ հովացման համակարգերի մշակմանը, որոնք ապահովում են ակտիվ տարրերից ժամանակին և միատարր ջերմության հեռացումը:

Ուսումնասիրության հիմնական նպատակն է որոշել ջրային հովացման օպտիմալ պարամետրերը, այդ թվում՝ հովացնող հեղուկի հոսքի արագությունը, որը հնարավորություն է տալիս զգալիորեն նվազեցնել ուժային կոնդենսատորների ջերմաստիճանը դրանց ինտենսիվ իմպուլսային բեռնվածության դեպքում: Ջերմային ռեժիմի փորձարարական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ հեղուկի շրջանառության արագության մեծացումը բարելավում է ջերմափոխանակությունը և նպաստում գերտաքացման նվազեցմանը, որն էլ հաստատվում է մի շարք չափումներով և արդյունքների գրաֆիկական ներկայացմամբ:

Աշխատանքում դիտարկվում են նաև հովացման համակարգում ջերմափոխանակության, ջերմային հաշվեկշռի և ջերմափոխանակման մեխանիզմների հիմնական սկզբունքները, ինչպես նաև պարամետրերի օպտիմալացման ազդեցությունը ջերմափոխանակության գործակցի վրա: Առաջարկվող միջոցները թույլ են տալիս զգալիորեն բարձրացնել սարքավորումների էներգաարդյունավետությունը, երկարացնել կոնդենսատորների ծառայության ժամկետը:

Որպես եզրակացություն կարելի է ընդգծել իմպուլսային էներգահամակարգերում ջերմության հեռացման համապարփակ և համակարգված մոտեցման կարևորությունը: Ներկայացված արդյունքները հիմք են ստեղծում ուժային բաղադրիչների հովացման համակարգերի ոլորտում ժամանակակից տեխնոլոգիական լուծումների հետագա հետազոտությունների և մշակման համար, որն արդիական է ինդուկցիոն տեխնոլոգիաների և բարձր ինտենսիվությամբ իմպուլսային բեռնվածությունների լայն սպեկտրի դեպքում:

Առանցքային բաներ. ջերմափոխանակություն, իմպուլսային ուժային կոնդենսատոր, ջրային հովացում, գալարախողովակ, ջերմային ռեժիմ:

ESTIMATING THE THERMAL PERFORMANCE IN IMPULSE CAPACITORS AT MEASURING THE COIL COOLING PARAMETERS

L.A. Vardanyan, S.S. Alaverdyan, E.V. Kurghinyan, G.V. Bareghamyan

A comprehensive study of thermal processes and methods for increasing the thermal stability of pulsed power capacitors of the serpentine type widely used in induction units and power electronics is carried out. One of the key problems in the operation of such devices is overheating, which significantly reduces their service life, reliability and stability of operation. In this regard, special attention is paid to the development of effective cooling systems that ensure timely and uniform heat removal from active elements.

The main objective of the study was to determine the optimal parameters of water cooling, including the flow rate of the cooling liquid, which made it possible to significantly reduce the temperature of power capacitors under their intense pulse load. The experimental analysis of the thermal mode showed that an increase in the fluid circulation rate improves heat exchange and helps to reduce overheating, which is confirmed by a series of measurements and a graphical presentation of the results.

The paper also considers the basic principles of heat transfer, heat balance and heat transfer mechanisms in the cooling system, as well as the effect of parameter optimization on the heat transfer coefficient. The proposed measures allowed to significantly increase the energy efficiency of the installation, increase the service life of capacitors and improve the overall reliability of power circuits.

The importance of a comprehensive and systematic approach to heat removal in pulse power systems is emphasized. The presented results create a basis for further research and development of modern technological solutions in the field of cooling power components, which is relevant for a wide range of industrial applications related to induction technologies and high-intensity pulse loads.

Keywords: heat transfer, pulse power capacitor, water cooling, coil, thermal mode.