

Салимова А.К., Исмаилов С.С.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье предлагается способы улучшения качества электрической энергии на судах. Судовая электроэнергетическая система должна обеспечивать надежное функционирование судовых систем, безопасность плавания, условия жизни и работы экипажа, экономичное генерирование и распределение электроэнергии требуемого качества, а также иметь оптимальное сочетание стоимости ее монтажа и эксплуатации при удовлетворительных массогабаритных показателях, как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Техно-экономические показатели СЭЭС определяются, в первую очередь, рациональным выбором рода тока, частоты и величины напряжения в системе, которые являются основными параметрами СЭЭС.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, качество электрической энергии, стабилизации напряжения

Введение. Основные параметры, определяющие технико-экономическую эффективность судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) – это род тока, значение напряжения, частота тока. Важную актуальность приобретает сегодня и качество электрической энергии. По требованию морского регистра судоходства коэффициент несинусоидальности напряжения судовой электрической сети не должен превышать 10%.

Основная часть. На судах [1,2] разрешается применение постоянного и переменного тока. Однако опыт эксплуатации СЭЭС показал преимущества переменного тока, особенно при больших мощностях энергетических систем.

Сравнивая составные элементы СЭЭС постоянного и переменного тока, необходимо отметить, что при использовании постоянного тока судовые электроприводы отличаются хорошими регулировочными и пусковыми характеристиками; электрораспределительные устройства – меньшими массой, габаритными размерами, стоимостью и объемом.

При использовании в СЭЭС переменного тока для электроприводов в основном применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели, реже – асинхронные двигатели с фазным ротором и синхронные двигатели.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели (благодаря отсутствию коллектора) обладают большей надежностью, меньшими на 30–40% массой и на 20–30% габаритными размерами, в 2–3 раза меньшей стоимостью, имеют более высокий КПД по сравнению с коллекторными двигателями и более низкий уровень шума.

Система управления асинхронным двигателем проще, а следовательно, он имеет большую надежность, меньшие габаритные размеры, массу и стоимость. Следует отметить сложность регулирования частоты вращения в широких пределах и значительные провалы напряжения при пуске мощных асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Следует отметить, что СЭЭС переменного тока дают возможность:

- преобразовать напряжение с помощью трансформаторов;
- разделять на отдельные, электрически не связанные друг с другом части (силовую и осветительную сети);
- получать электроэнергию с берега без преобразователей;
- применять более высокое напряжение;

–повысить уровень унификации судового электрооборудования с электрооборудованием общего (берегового) применения.

Если приемники электроэнергии постоянного и переменного тока на судне сравнительно одинаковы и по важности, и по количеству (например, суда технического флота), вопрос о выборе рода тока решается рассмотрением вариантов с определением экономической эффективности, которая ожидается от их внедрения.

На некоторых судах применяются два рода тока, когда гребные электродвигатели питаются постоянным током, а остальные приемники – переменным.

Размещение СЭС может быть различным. При небольших мощностях СЭС источники, преобразователи и распределительные устройства станции размещают в машинном отделении. Иногда источники электрической энергии устанавливают в помещении, смежном с машинным отделением, а распределительное устройство – вблизи с постом управления главными двигателями. Конечно, наиболее удачным является размещение источников электроэнергии в отдельном помещении, а распределительного устройства – в центральном посту управления энергетической установкой.

Так как условия работы судового электрооборудования в целом отличаются от общепромышленных условий, то это определяет следующие к нему требования: судовое оборудование должно надежно работать при длительном крене до 15° и дифференте до 5° , бортовой качке с амплитудой до $22,5^\circ$ с периодом 7–9 с и килевой – до 10° от вертикали, повышенной влажности и температуре; при кренах, качках и дифферентах аппаратура не должна самопроизвольно включаться; подвижные контакты электрооборудования не должны изменять коммутационного положения при бортовой качке с амплитудой до 45° .

При этом судовые электрические станции должны обеспечивать возможность:

- раздельной и параллельной работы генераторных агрегатов, электрической защиты генераторов, ГРЩ и подсоединенных к ним кабельных линий при возникновении аварийных ситуаций;
- связи с береговыми электрическими системами и СЭЭС других судов;
- управления качеством распределения генерируемой электроэнергии;
- выполнения эксплуатационного наблюдения за элементами СЭС и проведения ремонтных работ.

Согласно правилам регистра, номинальные напряжения на выводах источников электроэнергии не должны превышать следующих значений: 0,4 кВ (400 В) – при трехфазной системе переменного тока; 0,230 кВ (230 В) – при однофазной системе переменного тока; 0,23 кВ (230 В) – при постоянном токе.

Для судов технического флота, а также для специальных судов допускается применение трехфазной системы напряжением до 10 кВ включительно.

Следует отметить, что напряжение до 1000 В практически не оказывает влияния на массу, габаритные размеры и стоимость электрических машин и трансформаторов. Масса, габаритные размеры и стоимость электрических аппаратов и кабельных линий электропередачи зависят от напряжения и тока, протекающего по ним, а следовательно, и электrorаспределительные щиты, в которых устанавливаются электрические аппараты, будут иметь массу, габаритные размеры и стоимость, зависящие от напряжения и тока.

Однако следует помнить, что при малой мощности СЭЭС существенную роль начинают играть такие факторы, как механическая прочность жилы кабеля, дискретность стандартных значений сечений жил кабелей и т.д.

Важную роль при выборе значения напряжения судна имеет и напряжение береговых установок, особенно при постоянном питании с берега. Следует также помнить, что повышение напряжения СЭЭС всегда связано с увеличением вероятности поражения электрическим током, поэтому по мере роста напряжения СЭЭС должна повышаться эффективность мероприятий по обеспечению безопасности обслуживания.

Сети освещения необходимо отделять от силовых сетей.

Основной частотой переменного тока как на судах, так и в береговых электроустановках принята частота 50 Гц.

На современных судах имеется группа приемников, частота тока которых равна 400–500 Гц (радиолокационное, навигационное и другое оборудование). Их питание осуществляется от судовой сети с частотой 50 Гц через преобразователи, вращающиеся и статические, количество которых на крупных судах может быть значительным. Для таких приемников иногда целесообразно иметь систему централизованного снабжения электроэнергией переменного тока частотой 400–500 Гц.

Исследования показали, что увеличение частоты питающего тока приводит к снижению массы и габаритных размеров у вращающихся машин, трансформаторов, магнитных усилителей, конденсаторов, элементов электроавтоматики. Однако масса и габаритные размеры коммутационных аппаратов при повышении частоты тока увеличиваются из-за ухудшения условий дугогашения, а в связи с этим из-за повышения тепловыделений в шинпроводах увеличиваются масса и габаритные размеры электрораспределительных устройств.

Повышение частоты отрицательно сказывается на массе и габаритных размерах электрических кабелей, так как увеличение частоты приводит к увеличению потерь энергии и электрического сопротивления кабелей.

Качества электрической энергии это совокупность свойств электрической энергии, определяющих ее пригодность для судовых электроприемников. К показателям качества в установившихся режимах относят:

- длительное отклонение напряжения в данной точке системы по отношению к номинальному значению, %:

$$\Delta U = \frac{100(U - U_{nom})}{U_{nom}} \% ;$$

- длительное отклонение частоты тока по отношению к номинальному значению, %

$$\Delta f_q = \frac{(f - f_{nom}) \cdot 100}{f_{nom}} \% ;$$

- коэффициент несимметрии напряжения основной частоты в трехфазной системе, %

$$K_{несим.} = \frac{(U_{max} - U_{min}) \cdot 100}{U_{nom}} \% ,$$

где U_{max} , U_{min} – максимальное и минимальное значения линейного напряжения;

- коэффициент амплитудной низкочастотной модуляции напряжения переменного тока, %

$$k_{мод} = \frac{\Delta U_{мод}}{U_n} 100,$$

где $\Delta U_{мод}$ – амплитуда огибающей модулированного напряжения;

- модуляцию напряжения, которая может характеризоваться частотой модуляции,

$$f_{мод} = 1/T_{мод},$$

где $T_{мод}$ – период огибающей модулированного напряжения;

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %

$$K = \frac{\sqrt{\sum_2^n U_n^2}}{U_1} 100\%,$$

где – $\sum_2^n U_n^2$ – сумма квадратов действующих значений высших гармонических составляющих U_n данной периодической кривой;

U_1 – действующее значение основной гармонической составляющей данной гармонической кривой, В;

- коэффициенты пульсации напряжения постоянного тока, %:

$$k_{\text{пульс}} = \frac{U_{\mu}}{U_{\text{ср}}} 100\%,$$

где U_{μ} – амплитуда низшей гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$U_{\text{ср}}$ – среднее значение выпрямленного напряжения;

Для единообразия оценки пульсации напряжения при различных его средних значениях допускается величину $U_{\text{ср}}$ заменять $U_{\text{ном}}$, а величину $U_{\text{max}} + U_{\text{min}}$ – на величину $2U_{\text{ном}}$.

К показателям качества электроэнергии в переходных процессах СЭЭС относят: кратковременные отклонения напряжения, кратковременные отклонения частоты.

Следует отметить, что в последние двадцать лет в судостроении происходили быстрые и радикальные изменения, связанные с совершенствованием и применением гребных электрических установок. В эти годы для управления гребными двигателями переменного тока были разработаны преобразователи частоты большой мощности, созданы винторулевые колонки, современные гребные установки. Эти достижения намного повысили качественные характеристики гребных установок и позволили им потеснить пропульсивные комплексы с тепловыми двигателями, работающими непосредственно на гребной винт. По сравнению с другими видами пропульсивных комплексов современных гребных электроустановок обладают рядом преимуществ:

- повышение надежности судовой электроэнергетической установки и пропульсивного комплекса;
- улучшение маневренности судна;
- повышение КПД энергетической установки в долевых режимах;
- низкие уровни шума и вибрации;
- снижение эксплуатационных расходов;
- уменьшение сроков ремонтных работ;
- возможность более рационального размещения оборудования на судне.

Уникальные свойства современных гребных установок позволили в течение очень короткого времени найти применение на судах практически всех видов: круизных лайнерах, паромах, контейнеровозах, танкерах, рыбопромысловых, буксирах, судах снабжения и т.д.

ЭЭС современных судов с электродвижением строятся как единые системы, обеспечивающие питанием и многочисленные общесудовые потребители. От структуры и параметров СЭЭС зависят стоимость проектирования и постройки судов, работоспособность электрооборудования и систем автоматики, коммерческие показатели судов при эксплуатации, в том числе расход топлива, безопасность плавания судна и условия работы экипажа.

Отметим, что серьезной проблемой при создании СЭЭС является обеспечение электромагнитной совместимости общесудовых потребителей и гребных установок, которая для судовой электростанции является нелинейной нагрузкой. По требованию морского

регистра судоходства [2] в полностью укомплектованной судовой электроэнергетической системе коэффициент несинусоидальной кривой напряжения не должно превышать 10%.

Судостроительные организации применяют структуру СЭЭС с трансформаторами в составе ГЭУ. В таких установках проблема электромагнитной совместимости достаточно успешно решена.

При создании современных СЭЭС с полным электродвижением необходимо генерация и преобразования электрической энергии для мощных потребителей с использованием современных полупроводниковых преобразователей и обеспечения их надежной работы. Вместо существующий ранее так называемой интерференции гармонического состава напряжения в современных СЭЭС гармонический состав напряжения в электрической ветвь суммируется. Это является основным отличием поставленной задачи от многочисленных работ по улучшению гармонического состава в «большой» и автономной энергетике.

Для создания СЭЭС необходим системный подход с учетом требований нормативных документов. В соответствии с ними вступают в действие кроме ограничения по качеству электроэнергии и другие требования (надежность, массогабаритные показатели, электромагнитная совместимость, тепловые потери и др.) При этом необходимо использовать несколько признаков.

На СЭЭС желательно добиваться минимального гармонического состава за счет относительно низкокзатратных способов преобразования электроэнергии (использование диодных мостов выпрямления, широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для систем управления, многоуровневых инверторов, расщепления обмоток и др.). В последнюю очередь необходимо использовать различные фильтры, в том числе и активные.

Обычно на гармонический состав тока и напряжения в СЭЭС влияют следующие факторы:

- параметры генератора;
- мощность эквивалентной асинхронной нагрузки;
- наличие традиционных фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств и их параметры;
- использование активных фильтров;
- использование в статических полупроводниковых преобразователях (СПП) широтно-импульсной модуляции;
- использование многоуровневых инверторов;
- фазность системы электродвижения
- тип электродвигателя системы электродвижения (синхронный, асинхронный, вентильный)

Анализируя опыт проектирования и эксплуатации СЭЭС, можно сказать общесудовые потребители в зависимости от режима работы потребляют от 10 до 20% мощности. Однако использование мощных статических преобразователей в системе электродвижения других потребителей заставляет по новому формировать выходное напряжение при обеспечении качества электроэнергии.

Отметим, что статические преобразователи генерируют в сеть высшие гармоники. Общеизвестны их негативные последствия: снижение КПД и моментов электродвигателей, повышенный нагрев элементов системы, сбои в системах управления, связи и др. Если рассматривать типовую структурную схему (рис. 1), то видно, что необходимо обеспечивать синусоидальность токов и напряжений как на главном распределительном щите (ГРЩ), так в подсистеме электродвижения.

Основным параметром, влияющим на гармонический состав напряжения на ГРЩ, для типовых генераторов является сверхпереходное индуктивное сопротивление $-x_d''$. Уменьшение этого сопротивления приближает реальный источник электроэнергии к источнику бесконечной мощности. Применительно к судовым генераторам сопротивление x_d'' меняется от 0,11 до 0,32 о.е.

На судах часто устанавливаются приемники, требующие для своей работы электрическую энергию с параметрами, отличными от тех, с которыми вырабатывают ее источники.

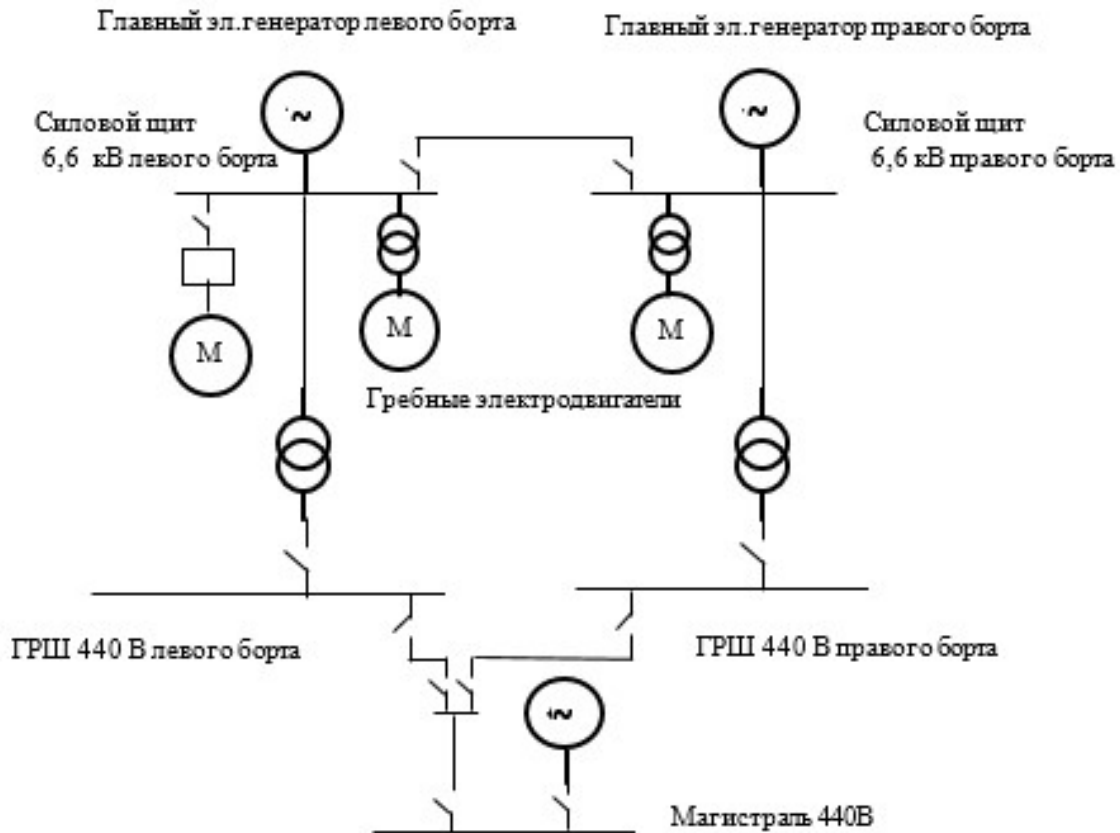


Рис.1. Структурная схема СЭЭС

Например, на судне в качестве источников установлены трехфазные генераторы напряжением 400 В, а для приемника – электрического освещения – требуется напряжение 220 В. На небольших судах установлен источник – генератор постоянного тока 27 В, а приемник – холодильник, работающий от сети переменного тока 220 В. В этих случаях для питания указанных приемников требуется установка соответствующих преобразователей. Проще всего выполнить такие преобразователи в виде двухмашинного агрегата, где одна машина – двигатель – должна быть рассчитана на электроэнергию с параметрами источника, а другая – генератор – должна вырабатывать электроэнергию с параметрами, которые необходимы для работы этих приемников.

Однако вращающиеся преобразователи обладают рядом недостатков, которые присущи всем вращающимся машинам, например, наличием скользящих контактов, подшипников, поэтому часто оказывается целесообразным использование статических преобразователей, в которых нет частей, перемещающихся одна относительно другой.

В судовых электростанциях для преобразования электрической энергии обычно используются трансформаторы, выпрямители и инверторы. Другие преобразователи, например преобразователи частоты, чаще используются для отдельных электроприводов.

На небольших судах, на которых источником электрической энергии является только генератор, навешенный на главный двигатель и вырабатывающий электрическую энергию только во время работы главного двигателя, для снабжения электроэнергией всех приемников во время его стоянки необходима установка какого-либо накопителя энергии. Этот накопитель

при работе генератора работает как приемник и накапливает энергию, а при стоянке генератора переходит в режим источника и отдает энергию в судовую сеть.

Многочисленные расчеты и мониторинг - непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, в сравнении с заданными критериями позволяют отметить, что в заданном диапазоне рассматриваемых мощностей и при заданных параметрах фильтров коэффициент модуляции инвертора влияет на качество электроэнергии в системе электродвижения (СЭД), причем увеличение коэффициента модуляции (K_t) управления инвертором улучшает гармонический состав СЭД, однако это сказывается на уровне напряжения инвертора [1].

Для повышения показателей КЭЭ предлагается применение современных FACTS- (Flexible AC Transmission System) - гибкие управляемые системы переменного тока, для регулирования реактивной мощности и напряжения в судовой ЭЭС и снижения гармоник тока и напряжения, а также колебания напряжения при резких нагрузках.

К устройствам FACTS относятся устройств: продольной компенсации как традиционного типа, так и регулируемые тиристорно-реакторные группы, статические тиристорные компенсаторы; вставки постоянного тока; электромеханические преобразователи частоты. Если к этому классу устройств отнести управляемые реакторы и СК, то под FACTS следует отметить, что применение гибких передающих систем переменного тока повышает качества электрической энергии [3].

Совокупность устройств, устанавливаемых в судовой электрической сети и предназначенных для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь, улучшает качества электрической энергии.

Установка быстродействующих STATCOM на шинах ВН (напряжением 6 кВ) и НН (440 В). Такое распределение STATCOM позволяет улучшить показатели качества электрической энергии на СЭЭС [4]. На рис.2 приведена схематическое представление СТАТКОМ

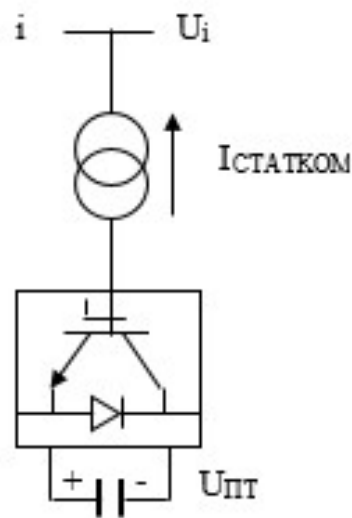


Рис. 2. Схематическое представление СТАТКОМ

Выводы. 1. Для повышения показателей КЭЭ предлагается применение современных FACTS для регулирования напряжения и реактивной мощности в судовой ЭЭС.

2. Используя активные фильтры для снижения гармоник напряжения возможно достичь нормально допустимые значения ПКЭЭ.

3. Применение быстросействующих СТАТОМ позволяет снижение колебаний напряжения при пусках асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сеньюв А.А., Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Токарев Л.Н. Судовые единые электроэнергетические системы // *Электротехника*. 2017. № 5. 240 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Т. 2. *Санкт-Петербург*, 2015. 300 с.
3. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Применение гибких передающих систем переменного тока как эффективный способ решения проблем в ЭЭС. *Проблемы энергетики*. 2010. № 4. С. 20-28.
4. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Экспериментальные исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электроэнергии на высоковольтной подстанции. *Промышленная Энергетика*. 2008. №5. С.50-53.

Salimova A.K., Ismailov S.C.

METHODS INCREASED QUALITY ELECTRIC ENERGY IN SHIP ELECTRIC ENERGY SYSTEMS

The article proposes ways to improve the quality of electrical energy on ships. The ship electric power system must ensure reliable operation of ship systems, navigation safety, living and working conditions of the crew, economical generation and distribution of electricity of the required quality, as well as an optimal combination of the cost of its installation and operation with satisfactory weight and dimensions indicators the entire system as a whole. Technical and economic indicators of the SEES are determined, first of all, by the rational choice of the type of current, frequency and voltage in the system, which are the main parameters of the SEE.

Keywords: ship power system, quality of electric energy, voltage stabilization.

Салимова А.К., Ісмаїлов С.С.

МЕТОДИ ПОВИШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУДОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

У статті пропонується способи поліпшення якості електричної енергії на судах. Судова електроенергетична система повинна забезпечувати надійне функціонування судових систем, безпеку плавання, умови життя і роботи екіпажу, економічне генерування і розподіл електроенергії необхідної якості, а також мати оптимальне поєднання вартості її монтажу і експлуатації при удільно-масогабаритних показниках, як окремих елементів, так і всієї системи в цілому. Техніко-економічні показники СЕЕС визначаються, в першу чергу, раціональним вибором роду струму, частоти і величини напруги в системі, які є основними параметрами СЕЕС.

Ключові слова: судова електроенергетична система, якість електричної енергії, стабілізації напруги.

Глуценко П.А., Панін В.В., Масік І.П., Зазарний А.Ю.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СПРОЇДНИХ КІНЦЕВИХ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ НА АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИЛ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ КОРАБЕЛЬНОГО БАЗУВАННЯ

Успішність виконання завдань безпілотним літальним апаратом з моніторингу поверхні моря в інтересах судна значною мірою залежить від дальності і тривалості польоту, на які безпосередньо впливає аеродинамічна якість, як літального апарату в цілому, так і крила, як основного несучого елемента. Одним із способів покращення аеродинамічної якості безпілотного літального апарату, що не потребує внесення значних змін у конструкцію, є встановлення кінцевих аеродинамічних поверхонь на крилі для зниження індуктивного опору. Підвищення аеродинамічної якості сучасних безпілотних літальних апаратів, з метою зменшення витрат енергії і, як наслідок, збільшення дальності та тривалості польоту залишається актуальною задачею. На даний час значно розширилась сфера і кількість застосування малогабаритних безпілотних літальних апаратів, що стимулює активізацію робіт в напрямку покращення аеродинамічних характеристик даних літальних апаратів. В основі методики визначення аеродинамічних характеристик крил є ділення виникаючих сил на їх складові, в залежності від природи їх виникнення. Так нормальні сили, обумовлені розподілом тиску по поверхні, добре розраховуються вирішенням задач обтікання нев'язким нестисливим середовищем. Одним із відомих і добре перевірених на практиці методів вирішення зазначених вище задач є модифікований метод дискретних вихорів. Іншою задачею є визначення профільного опору. Як відомо, профільний опір обумовлений дотичними силами (силами тертя) та нормальними (розподілом тиску по поверхні профілю) можна вважати постійним при незначних змінах кута атаки. За розробленою методикою було вивчено вплив встановлення кінцевих аеродинамічних поверхонь та їх геометричних параметрів на сумарні та розподілені аеродинамічні характеристики крил. Встановлено, що кінцеві аеродинамічні поверхні змінюють структуру течії на поверхні крила та за ним, що призводить до зміни аеродинамічних характеристик, що обумовлено усуненням кінцевого вихору з поверхні крила та розмиттю концентрованого вихору позаду крила. Внаслідок цього зменшення індуктивного опору переважає над збільшенням профільного опору, що вносять кінцеві аеродинамічні поверхні. Зміна структури течії на поверхні крила змінює розподіл навантаження в перерізах крила, що призводить до збільшення коефіцієнту підйомної сили. В результаті зазначених факторів аеродинамічна якість для компоновань крило – спіроїди збільшена на 10 – 22 % у порівнянні з крилом без кінцевих аеродинамічних поверхонь.

Ключові слова: кінцеві аеродинамічні поверхні, аеродинамічні характеристики, безпілотні літальні апарати корабельного базування, візуалізація потоку.

Постановка проблеми. Стрімкий прогресивний розвиток безпілотних авіаційних комплексів обумовлює поширення сфер застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Не виключенням є морська галузь. Можливо застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах судна. Особливо це важливо при підході до крупних морських портів, з метою візуальної оцінки проходу інших кораблів. Це дасть змогу зменшити ризик зіткнення з іншими суднами. Успішність виконання завдань безпілотними літальними апаратами з моніторингу поверхні моря в інтересах судна значною мірою залежить від дальності і тривалості польоту, на які безпосередньо впливає аеродинамічна якість, як літального апарату (ЛА) в цілому, так

і крила, як основного несучого елемента. Одним із способів покращення аеродинамічної якості БПЛА, що не потребує внесення значних змін у конструкцію, є встановлення кінцевих аеродинамічних поверхонь (КАП) на крилі для зниження індуктивного опору. Підвищення аеродинамічної якості сучасних БПЛА з метою зменшення витрат енергії і, як наслідок, збільшення дальності та тривалості польоту залишається актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення аеродинамічної якості, як і інших аеродинамічних характеристик (АДХ), крил ЛА з кінцевими аеродинамічними поверхнями є відомою задачею, для вирішення яких присвячено велику кількість робіт, як наприклад [1–7]. Але більшість робіт присвячена розрахунку АДХ крил з КАП для важких, великогабаритних, транспортних ЛА, де ефект від застосування КАП найбільш відчутний. Наприклад в роботах [1, 4, 6, 7] проводяться дослідження з урахуванням великих чисел Рейнольдса та не дають чіткого розуміння можливості застосування на малогабаритних ЛА, політ яких характеризується значно меншими числами Рейнольдса. На даний час значно розширилась сфера і кількість застосування малогабаритних БПЛА, що стимулює активізацію робіт в напрямку покращення аеродинамічних характеристик даних ЛА. Але і в роботах [3, 6–8] не представлено методик визначення АДХ крил з КАП при малих числах Рейнольдса з науковою достовірністю. В вказаних роботах також не розглядається вплив геометричних параметрів спіроїдних КАП на аеродинамічні характеристики КАП.

Метою даної роботи є визначення впливу спіроїдних кінцевих аеродинамічних поверхонь з різними геометричними параметрами на аеродинамічні характеристики крил, що характерні для малогабаритних та мало швидкісних БПЛА, а також визначення зміни структури потоку на поверхні крила при встановленні КАП.

Основні матеріали досліджень. В основі методики визначення АДХ крил з кінцевими аеродинамічними поверхнями для малогабаритних та малошвидкісних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ділення виникаючих сил на їх складові, в залежності від природи їх виникнення. Так нормальні сили, обумовлені розподілом тиску по поверхні, добре розраховуються вирішенням задач обтікання нев'язким нестисливим середовищем. Одним із відомих і добре перевірених на практиці методів вирішення зазначених вище задач є модифікований метод дискретних вихорів (МДВ) [9]. Застосування МДВ для розрахунку АДХ крил для малогабаритних малошвидкісних БПЛА є доцільним, оскільки при низьких швидкостях польоту вплив стисливості не є суттєвим. До того ж МДВ не потребує значних потужностей обчислювальної техніки та демонструє добру збіжність отриманих результатів з відомими достовірними даними. Це дозволить розрахувати підйомну силу та індуктивний опір обумовлений нею. Іншою задачею є визначення профільного опору. Як відомо, профільний опір обумовлений дотичними силами (силами тертя) та нормальними (розподілом тиску по поверхні профілю) можна вважати постійним при незначних змінах кута атаки. Внаслідок складності розрахунку профільного опору, особливо при малих значеннях числа Рейнольдса, якими характеризується політ малорозмірних БПЛА, пропонується визначати профільний опір експериментально при випробуваннях в аеродинамічній трубі. Доволі точним і простим є визначення сили опору методом імпульсів [10]. Також для отримання можливості оцінити значення аеродинамічних характеристик крил з КАП при різних значеннях числа Рейнольдса враховується методика викладена в [11]. Суть полягає в тому, що профільний опір крила суттєво залежить від положення зони (точки) переходу ламінарної течії в турбулентну на поверхні крила. Положення даної зони значною мірою залежить від числа Рейнольдса, яким характеризується умови польоту. Застосування даної методики дозволить уточнити значення аеродинамічних характеристик крил з КАП при різних умовах застосування.

Визначивши і розрахувавши вихідні дані для отримання АДХ крил з КАП необхідно провести випробування відповідних моделей в аеродинамічних трубах, а за можливості і льотні випробування для верифікації отриманих результатів і перевірки адекватності розрахункових схем. Структурно-логічна схема методики представлена на рис. 1.

Для верифікації даної методики було обрано тестову задачу з відомим рішенням [12] при числі Рейнольдса $Re = 100000$. В якості моделі було обрано крило з профілем NASA 2412 з прямою передньою кромкою. Площа моделі напівкрила $S_{кр} = 3.58 \text{ м}^2$, подовження $\lambda = 4,4692$, звуження $\eta = 0,79$. Число Рейнольдса по хорді крила складає 100000. Більш детально геометричні характеристики крила та КАП наведено в [12]. Для порівняння отриманих результатів на рис. 2 представлено залежності аеродинамічної якості K від кута атаки α . Певні розбіжності обумовлені різними підходами до моделювання процесу обтікання. Але ефект від встановлення КАП необхідно оцінювати за зміною аеродинамічної якості ΔK , залежність якого від кута атаки наведено на рис. 3.

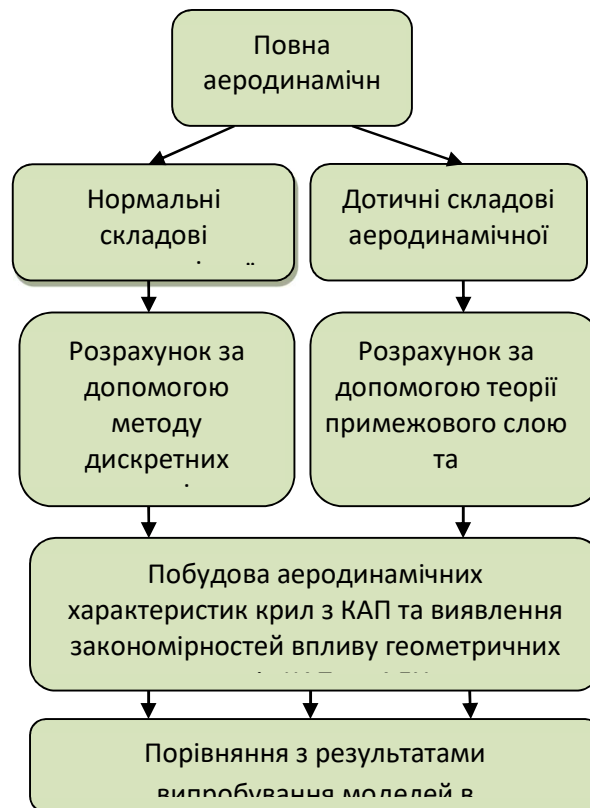


Рис. 1. Структурно-логічна схема методики визначення АДХ крил з КАП спіроїдного типу

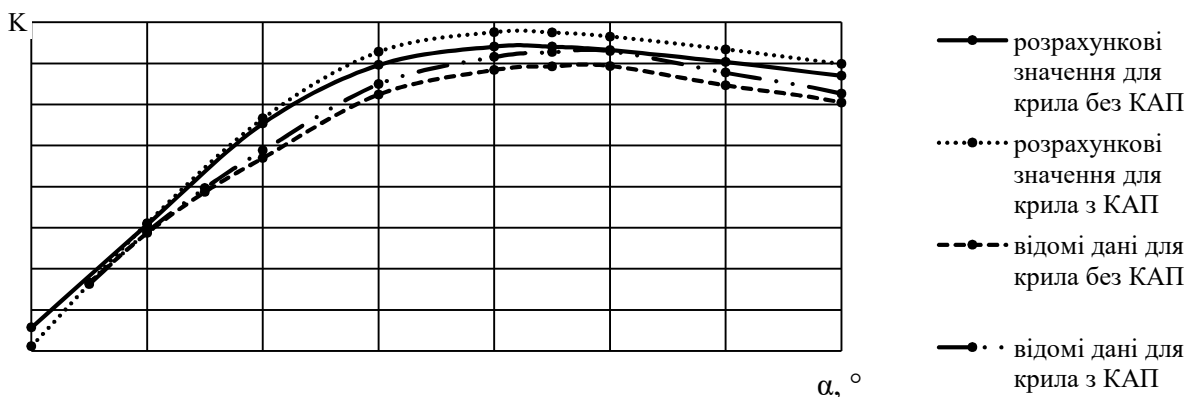


Рис. 2. Залежність аеродинамічної якості K від кута атаки α

Аналіз представлених залежностей дозволяє зробити висновок, що вказана методика дає задовільне співпадіння отриманих розрахунковим шляхом результатів з вже відомими даними. Це дає змогу застосувати дану методику і в подальших розрахунках крил з КАП для БПЛА. Похибка у визначенні зміни аеродинамічної якості ΔK складає від 1 до 10 %. Це дозволяє зробити висновок, що застосування зазначеного підходу можливо для виявлення ефекту від застосування спіроїдних КАП. Також слід звернути увагу на те, що методика дає дещо гірші значення аеродинамічної якості з метою гарантування необхідних льотно-технічних характеристик.

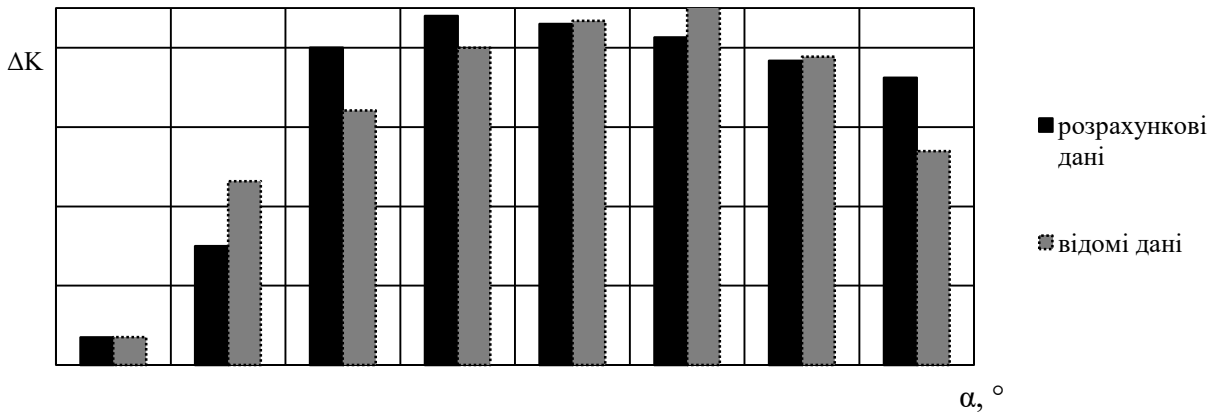


Рис. 3. Зміна аеродинамічної якості ΔK при різних кутах атаки α

Також для розглянутої моделі було визначено розподіл нормальної сили C_n вздовж розмаху крила без КАП та при обладнанні застосуванні різних типів КАП (рис. 4). Зміна розподілу нормальної сили вздовж розмаху крила обумовлена зміною структури потоку на поверхні крила.

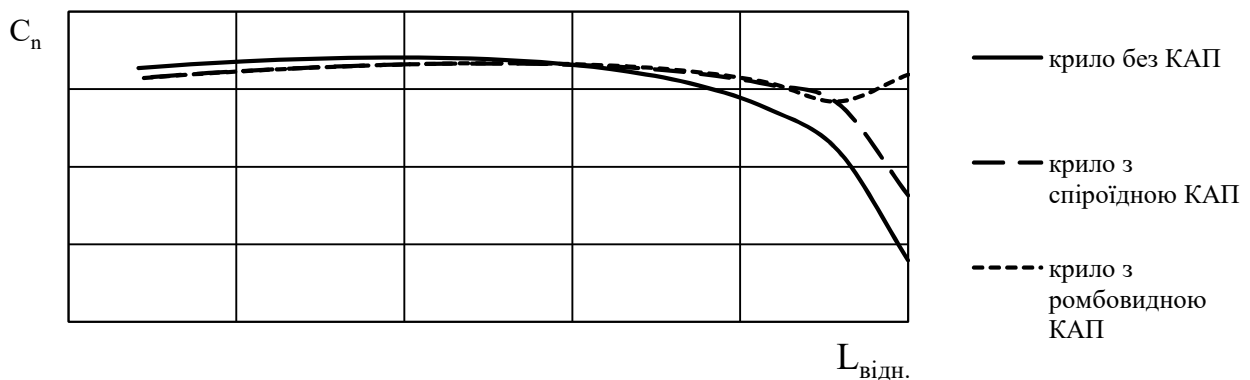


Рис. 4. Розподіл нормальної сили C_n вздовж розмаху напівкрила $\bar{L}_{\text{відн}}$

З аналізу представлених залежностей можна зробити висновок про те, що різні типи КАП впливатимуть по-різному на структуру на поверхні крила і, як наслідок, в сліді за крилом. Це обумовлює зміни в вихровій структурі позаду крила. Наслідком цього є зміна індуктивного опору відносно крила без КАП.

В роботі визначався вплив геометричних параметрів спіроїдних КАП на АДХ крил. Одним із основних геометричних параметрів спіроїдних КАП є радіус спіроїди r . На рис. 5 представлено приклади спіроїдних КАП з різним відносним радіусом \bar{r} . В даній роботі хорда

моделей крил була сталюю, тому під відносним радіусом слід розуміти відношення радіусу спіроїди до розмаху крила.

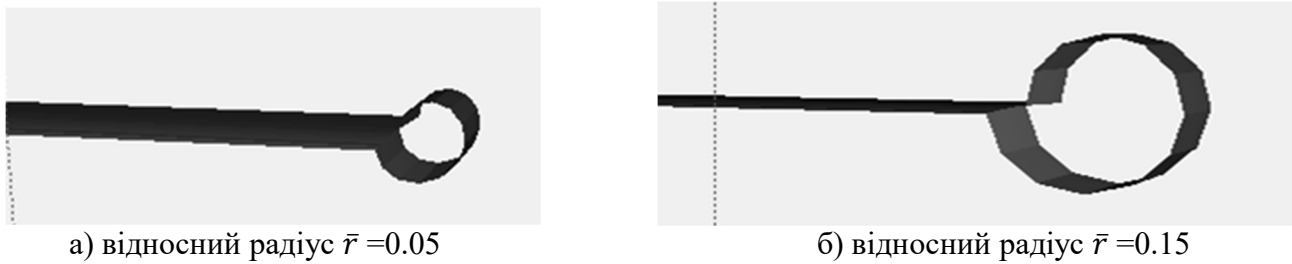


Рис. 5. Приклад зміни відносного радіусу спіроїдних КАП

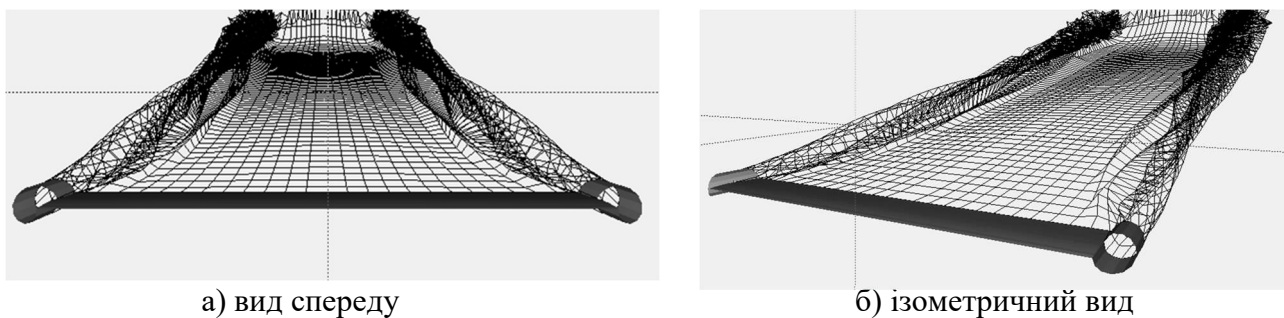


Рис. 6. Розрахункова схема та положення пелени крила з КАП

В якості моделі було обрано прямокутне крило з профілем НАСА 23012. Подовження крила складає $\lambda = 4$, число Рейнольдса по хорді крила склало $Re = 210000$. Результати розрахунків наведені на рис. 7–9.

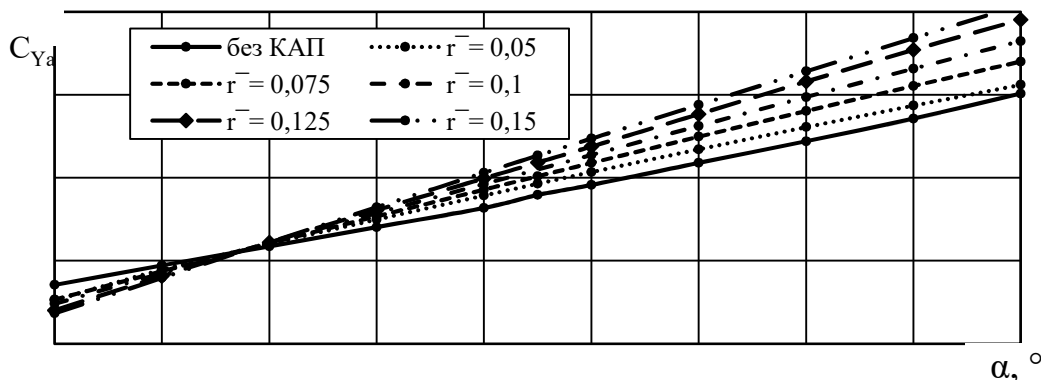
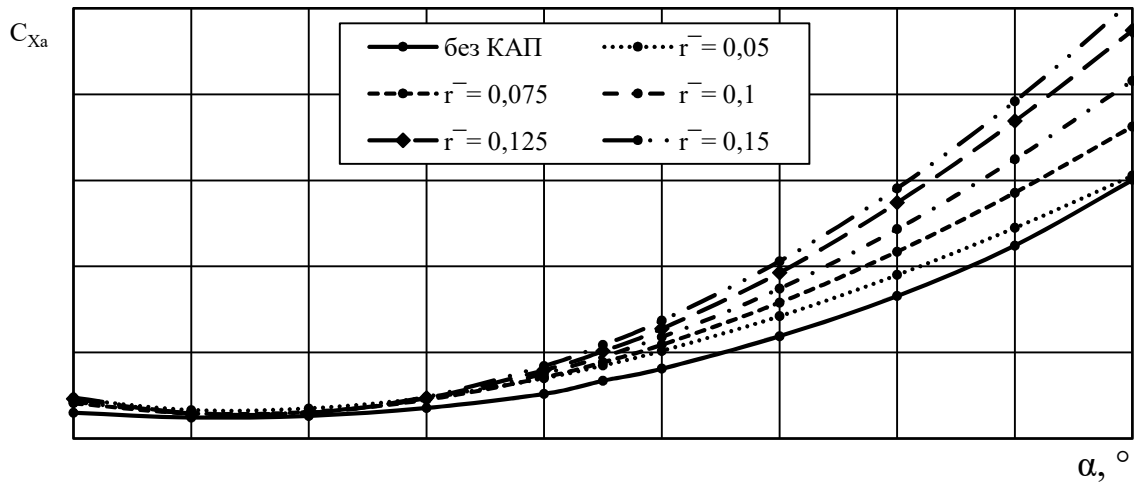
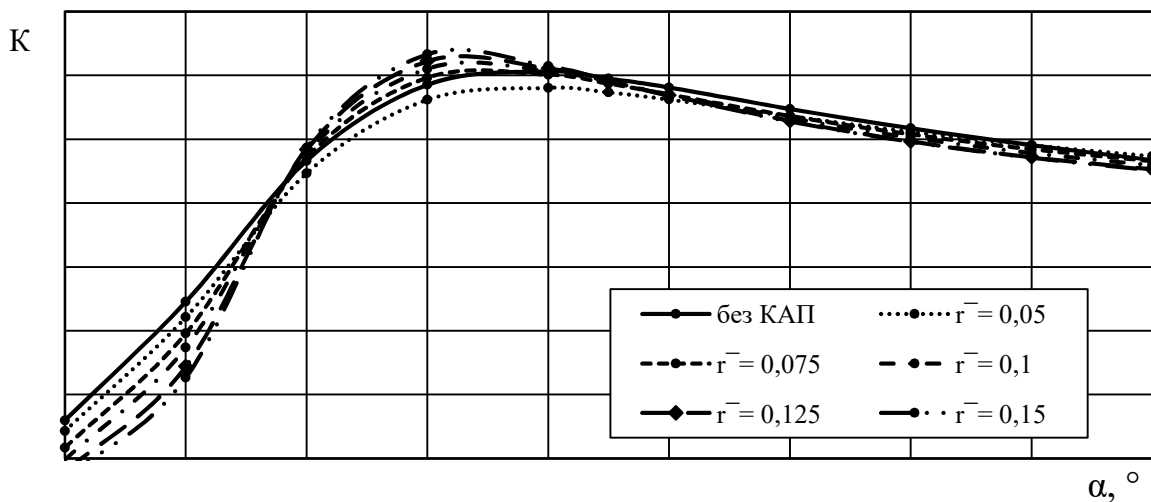


Рис. 7. Залежність коефіцієнту підйомної сили C_{ya} від кута атаки α при різних \bar{r}

Як видно із представлених графічних залежностей на рис. 7 – 9, крила змінюють АДХ в залежності від радіусу спіроїди. Встановлення КАП збільшує значення коефіцієнту підйомної сили (рис. 7), що є наслідком збільшення площі несучої поверхні. Коефіцієнт сили лобового опору (рис. 8) збільшує значення з двох причин.

По-перше, збільшується профільний опір крила з КАП зі збільшенням омиваємої поверхні. По друге, зі збільшенням підйомної сили збільшується і складова індуктивного опору. В той же час, КАП змінюють структуру течії на поверхні крила та в сліді за крилом, що зменшує значення коефіцієнту отвалу поляри. Сумарні зміни аеродинамічних можливо оцінити за залежністю аеродинамічної якості (рис. 9) від кута атаки.


 Рис. 8. Залежність коефіцієнту лобового опору $C_{x\alpha}$ від кута атаки α при різних \bar{r}

 Рис. 9. Залежність аеродинамічної якості K від кута атаки α при різних \bar{r}

З аналізу графічних залежностей (рис. 9) можливо зробити висновок, що малі розміри КАП погіршують аеродинамічну якість крил. Більші спіроїдні КАП покращують несучі властивості крила, але у певному діапазоні кутів атаки. В той же час, діапазон кутів атаки від 0 до 4 град є найбільш застосовуваний при виконанні польоту літального апарату, особливо при малих числах Рейнольдса.

Визначення аеродинамічних характеристик літального апарату з випробувань його моделей в аеродинамічних трубах залишається основним і найнадійнішим засобом при розробці нових компонентів літальних апаратів (ЛА) і при вдосконаленні вже існуючих. Для перевірки результатів числових розрахунків було проведено порівняння залежностей підйомної сили від кута атаки для моделей крил різного подовження без КАП і з КАП (рис. 10 – 11). Моделі крила для продувки в аеродинамічній трубі Т-1 виконані із дерева, методом переклеювання. Спіроїдні КАП виконані з пластику. Всі елементи прошпакльовані, ретельно відшліфовані та пофарбовані. Крила прямокутної форми в плані подовженням $\lambda = 2$ та $\lambda = 3$ з профілем NASA 23012. Спіроїди виконані з пластики товщиною 3 мм. Відносний радіус спіроїди для крила з подовженням $\lambda = 2$ складає $\bar{r} = 0,077$, а для крила з $\lambda = 3$ відносний радіус складає $\bar{r} = 0,0512$. Число Рейнольдса по хорді крила склало 228000.