Міністерство освіти і науки України
Херсонська державна морська академія
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Одеський національний морський університет
Національний університет «Одеська морська академія»
ДП «ДержавтотрансНДІпроект»
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Національний транспортний університет
Інститут газу НАН України
Український державний університет залізничного транспорту
Херсонський національний технічний університет
University of Zilina (Словаччина)
University of Warmia and Mazury in Olsztyn (Польща)
Rzeszow University of Technology (Польща)
University of Technology and Humanities in Radom (Польща)
Науково-виробнича компанія «Modern Multi Power Systems» s.r.o. (Чехія)

МАТЕРІАЛИ

10-ї Міжнародної науково-практичної конференції

СУЧАСНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ТРАНСПОРТІ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Присвячено 185-річчю Херсонської державної морської академії

Херсон – 2019

Науковий комітет:

Організаційний комітет:

Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 10-та Міжнародна науково-практична конференція, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія.

В матеріалах 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» представлені доповіді, які присвячені проблемам експлуатації, виробництва та проектування енергетичних установок та устаткування на транспорті, а також підготовці спеціалістів у сфері транспортної енергетики й устаткування.

Кравченко С.А.,Ліньков О.Ю., Пильов В.В. ПОКРАЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГОЛОВКИ ЦИЛІНДРІВ СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ……………………….. 206
Лебедь Н.И, Лебедь О.Н. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОСТРОСТА НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПИН GAAS……………………….. 208
Лебедь Н.И, Лебедь О.Н. ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР ПРИМЕСЕЙ ЭС GAAS, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ РАСТВОРОВ-РАСПЛАВОВ…………………….. 211
Лебедь Н.І, Лебедь О.М. ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ФРОНТУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ GAAS ПРИ ВИРОЩУВАННІ З РІДКОЇ ФАЗИ……………………. 213
Литвин С.Н. ФАЗИРОВАННЫЙ ВПРЫСК ТОПЛИВНОГО ГАЗА В ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ……………………………………………………………………….. 215
Несин Д.Ю., Терлыч С.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ГЛАВНОЙ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КРАНОВОГО СУДНА БОЛЬШОЙ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ………………………………………………………. 217
Савчук В.П. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ………………………………………………………... 221
Самарін О.Є. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОДУВНИХ КЛАПАНІВ ІЗ ЗАДАНИМ ТИСКОМ ВІДКРИТТЯ В ЦИЛІНДРІ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА……………………………… 225
Самарін О.Є. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОДУВНИХ КЛАПАНІВ З МЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ В ЦИЛІНДРІ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА……………………………... 229
Самарін О.Є. ЗАСТОСУВАННЯ САМОРЕГУЛЬОВАНИХ ПРОДУВНИХ КЛАПАНІВ В ЦИЛІНДРІ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА………………………………. 233
Слинько Г.І., Полуведько С.Ю., Сухонос Р.Ф., Слинько В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОДУВКИ ДВОТАКТНОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА З СИСТЕМОЮ ПРОДУВКИ ЦИЛІНДРА ЧИСТИМ ПОВІТРЯМ З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ………………………... 237
Соломонюк Д.М. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ РЕГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГТУ ДЛЯ МОРСЬКОГО І НАЗЕМНОГО ВИКОРИСТАННЯ………... 240
Черняк Ю.В., Горобченко О.М., Гатченко В.О., Station Каращук С.В. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОВОЗУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ…………………….. 243
Шульженко А.А., Jaworska L., Гаргин В.Г., Соколов А.Н., Романко Л.А., Луцак Э.Н., Гаращенко В.В., Шульженко А.А., Русинова Н.А. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК N-СЛОЙНЫХ ГРАФЕНОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО СПЕКАНИЕМ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ В СИСТЕМЕ АЛМАЗ–МЕДЬ………………………………………………………………………. 245
Щедролосєв О.В., Узлов О.М., Кириченко К.В. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СТАПЕЛЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОНТОНІВ КОМПОЗИТНИХ ПЛАВУЧИХ ДОКІВ……………………………………………………. 248
Щедролосєв О.В., Терлич С.В., Коновалова Г.В., Щедролосєв М.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ХОДОВИХ ЯКОСТЕЙ ПЛАВУЧОГО БУДИНКУ……………………. 251

СЕКЦІЯ 5. ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ СПЕЦІАЛІСТІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ………………………………………………………....... 254

Білоусова Т.П., Максимук Г.Є., Тулученко Г.Я. ОБЧИСЛЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ГІПЕРГЕОМЕТРИЧНИХ ІНТЕГРАЛІВ У ФОРМУЛАХ ШВАРЦА-КРИСТОФФЕЛЯ………………………………………………………………………... 255
Васильченко Г.Ю., Знамеровська Н.П., Татаринцева Ю.Г. ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ ФАХІВЦІВ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА УМОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ СТУПЕНЕВОЇ ПІДГОТОВКИ………………………………….. 260
Годлевський П.М., Круглик М.І. ФІЗИЧНЕ ВИХОВАННЯ ЯК ОСНОВА РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ПІДГОТОВКИ СПЕЦІАЛІСТІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ………….. 263

ОБЧИСЛЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ГІПЕРГЕОМЕТРИЧНИХ ІНТЕГРАЛІВ У ФОРМУЛАХ ШВАРЦА-КРИСТОФФЕЛЯ

Білоусова Т.П., Максимук Г.Є., Тулученко Г.Я.
Херсонський національний технічний університет (Україна)

Задачі, які мають велику кількість способів розв’язання, дозволяють долучати студентів до ведення дослідницької діяльності. До таких задач відносяться, зокрема, задачі побудови конформних відображень. Як показує аналіз сучасних публікацій з методів розв’язання крайових та граничних задач, серед дослідників відновлюється інтерес до несіткових методів розв’язання таких задач. Методи побудови конформних перетворень, в даному випадку, виступають як допоміжні методи при роботі з областями складної геометричної форми.

Конформне відображення одиничного круга на внутрішність багатокутника Ω здійснюється за допомогою формули Шварца-Кристоффеля:

$$f(z) = A + C \cdot \int_{z_0}^{z} \prod_{k=1}^{N} \left(1 - \frac{t}{z_k}\right)^{\alpha_k - 1} dt\,, \tag{1}$$

де w_k $\left(k = \overline{1;N}\right)$ – вершини багатокутника; N – кількість вершин багатокутника; $\alpha_k \pi$ $\left(k = \overline{1;N}\right)$ – кути багатокутника; z_k – образи вершин багатокутника на границі круга; z_0 – довільна внутрішня точка круга; A та C – комплексні константи, які підлягають визначенню.

L.N. Trefethen запропонував наближені методи знаходження параметрів як прямого відображення (1), так і оберненого до нього [1]. В обох випадках виникає потреба в наближеному обчисленні з високою точністю інтегралів, які відносяться до узагальнених гіпергеометричних інтегралів. Ці методи реалізовані в пакеті SC Toolbox, який сумісний з комплексом програм MATLAB.

Підінтегральна функція $\prod_{k=1}^{N} \left(1 - \frac{t}{z_k}\right)^{\alpha_k - 1}$ є багатозначною аналітичною функцією. Для виділення її однозначної вітки виконаємо розрізи комплексної площини у формі зірки Міттаг-Леффлера, тобто по променям, які виходять із особливих точок z_k і утворюють кути з полярною віссю $\arg(z_k)$.

Для обчислення інтегралів виду (1) для випадку, коли z не є особливою точкою розгалуження підінтегральної функції, можна використовувати звичайні квадратурні формули. Якщо точка z є особливою точкою розгалуження підінтегральної функції L.N. Trefethen застосовує квадратурну формулу Гаусса-Якобі, яка дозволяє явно враховувати особливість, що існує в кінцевій точці відрізка інтегрування.

Але обчислювальні експерименти авторів робіт [1–2] показують, що згущення особливих точок в достатній близькості одна від одної або від внутрішніх точок відрізка інтегрування приводить до суттєвого погіршення точності квадратурних формул. Для досягнення прийнятної точності в таких випадках L.N. Trefethen пропонує використовувати складені квадратурні формули, в яких відрізок інтегрування ділиться на частини за правилом половини: ніяка особлива точка не може знаходитися ближче до відрізка інтегрування, ніж половина довжини цього відрізка.

L.N. Trefethen з'ясував, що кількість точних цифр у значенні інтеграла Шварца-Кристоффеля, яке обчислене з дотриманням правила половини, приблизно дорівнює кількості вузлів на підінтервалі в квадратурній формулі Гаусса-Якобі.

У роботі [2] пропонується інший підхід до обчислення узагальнених гіпергеометричних інтегралів:

$$F(z) = \int_0^z \prod_{j=1}^{N} \left(1 - s_j t\right)^{\gamma_j} dt\,, \qquad (2)$$

де s_j^{-1} $\left(j = \overline{1;N}\right)$ – особливі точки підінтегральної функції комплексного змінного t; $s_j \neq 0$; N – кількість особливих точок; γ_j $\left(j = \overline{1;N}\right)$ – комплексні показники степенів.

Інтеграли виду (1) із дійсними показниками степенів є окремим випадком інтегралів виду (2). Підхід до обчислення інтегралів виду (2), який запропонований авторами роботи [2], ґрунтується на методі розвинення аналітичної функції вздовж ланцюга областей. Особливістю підходу є нескінченна множина способів вибору таких ланцюгів областей. Перед проведенням досліджень також виділяється однозначна вітка підінтегральної функції за допомогою розрізів комплексної площини в формі зірки Міттаг-Леффлера.

Спочатку наведемо основні кроки алгоритму обчислення інтегралів виду (2) у нотації, яка застосована авторами роботи [2]. Після цього розглянемо алгоритм розв'язання цієї ж задачі, який орієнтований на програмну реалізацію засобами математичного процесора Maple.

Продиференціюємо рівність (2) двічі. При цьому послідовно отримаємо:

$$F^{/}(z) = \prod_{j=1}^{N} \left(1 - s_j z\right)^{\gamma_j}\,; \qquad (3)$$

$$\frac{F^{//}(z)}{F^{/}(z)} = -\sum_{j=1}^{N} \frac{s_j \gamma_j}{1 - s_j z}\,.$$

Помноживши обидві частини останньої рівності на $F^{/}(z) \cdot \prod_{j=1}^{N} \left(1 - s_j z\right)$, отримаємо лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку:

$$F^{//}(z) \cdot \prod_{j=1}^{N} \left(1 - s_j z\right) = -F^{/}(z) \cdot \sum_{j=1}^{N} \left(s_j \gamma_j \cdot \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{N} \left(1 - s_l z\right) \right). \qquad (4)$$

Для тестового прикладу, який розглядаються в даній статті будемо будувати розв'язки рівняння (4) у вигляді аналітичних розвинень функції $F^{/}(z)$ в областях, які є околами регулярних та особливих точок. Радіус кожного околу дорівнює відстані від його центра a_k до найближчої особливої точки:

$$r_k = \min_j \left| a_k - s_j^{-1} \right|, \qquad (5)$$

де $j = \overline{1;N}$; $k = \overline{1;K}$; K – кількість околів.

Розв'язок рівняння (4) в околі регулярної точки ***a*** будемо шукати у вигляді розвинення функції $F^{/}(z)$ у ряд Лорана з правильною частиною:

$$F^{/}(z)=\sum_{m=0}^{\infty} f_m \cdot (z-a)^m \ . \tag{6}$$

Підставивши вираз (6) до рівняння (4), отримаємо:

$$\sum_{m=0}^{\infty}\left(m \cdot f_m \cdot (z-a)^{m-1}\right)\cdot \prod_{j=1}^{N}\left(1-s_j a\right)=-\sum_{m=0}^{\infty}\left(f_m \cdot (z-a)^m\right)\cdot \sum_{j=1}^{N}\left(s_j\gamma_j \cdot \prod_{\substack{l=1\\ l\neq j}}^{N}\left(1-s_l a\right)\right). \tag{7}$$

Прирівнявши в (7) коефіцєнти при однакових степенях $(z-a)^m$, отримаємо рекурентне співвідношення для знаходження шуканих коефіцієнтів f_m:

$$m \cdot f_m \cdot \prod_{j=1}^{N}\left(1-s_j a\right)=-f_{m-1}\cdot \sum_{j=1}^{N}\left(s_j\gamma_j \cdot \prod_{\substack{l=1\\ l\neq j}}^{N}\left(1-s_l a\right)\right);\ m=\overline{1;\infty}\ ;$$
$$f_0=\prod_{j=1}^{N}\left(1-s_j a\right)^{\gamma_j} \ . \tag{8}$$

У разі багатозначності для множників $\left(1-s_j a\right)^{\gamma_j}$ обирається та вітка, для якої множник дорівнює 1, коли $a=0$.

Авторами роботи [2] ефективність розробленого методу обґрунтовується за рахунок існування наближеної лінійної залежності часу роботи алгоритму від порядку ***p*** заданої точності результату $\varepsilon=10^{-p}$. Крім того, запропонований алгоритм виявляє ознаку стійкості при спостереженні явища згущення особливих точок, коли втрачається точність розрахунків.

У разі відсутності згущення особливих точок дії (3−8) еквівалентні розвиненню в ряд Лорана функції (3) в регулярній точці. Розвинення функції в ряд Лорана в заданій точці в СКМ Maple виконується командою **laurent** і не потребує спеціального програмування.

Розв'язок рівняння (4) в околі особливої точки $a=s_q^{-1}$ будемо шукати у вигляді розвинення функції $F^{/}(z)$ у степеневий ряд спеціального виду:

$$F^{/}(z)=\left(1-s_q z\right)^{\gamma_q}\cdot \sum_{m=0}^{\infty}\hat{f}_m \cdot \left(1-s_q z\right)^m \ . \tag{9}$$

Підставивши вираз (9) до рівняння (4), теж отримаємо рекурентне співвідношення, яке наведено в [2]. За відсутності ускладнень з боку розташування особливих точок коефіцієнти $\hat{f}_m$ можуть бути знайдені, як коефіцієнти розвинення в ряд Лорана допоміжної функції, яка утворюється з функції (3) виключенням множника $\left(1-s_q z\right)^{\gamma_q}$, який відповідає особливій точці $a=s_q^{-1}$:

$$\widetilde{F}(z) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq q}}^{N} \left(1 - s_j z\right)^{\gamma_j} . \tag{10}$$

Усі перелічені формули застосовуються в межах околів обраних точок, в яких здійснювалися розвинення. Вибір послідовності центрів околів може здійснюватися нескінченною множиною способів. Для загального випадку задача оптимізації їх вибору не може бути розв'язана через її надзвичайну громіздкість.

Досліджувана задача є аналогічною до задачі побудови складеної квадратурної формули. Тому чим більша залучається кількість околів, тим менша кількість доданків може бути використана в розвиненні в степеневі ряди, та навпаки. Як відомо, оптимальні складені квадратурні формули будуються для обчислення серій однотипних інтегралів. Тому перейдемо до розгляду конкретної задачі.

При її розв'язанні будемо дотримуватися правила, що інтегрування виконується в межах околів, які менші за теоретично можливі. Радіуси околів для розрахунків складатимуть $0{,}9 \cdot r_k$, як це визначено емпіричним шляхом авторами роботи [2] на основі чисельних практичних розрахунків.

Знайдемо за допомогою пакету SC Toolbox пряме конформне відображення одиничного круга на внутрішність багатокутника для відомого з літератури прикладу. Для цього скористаємося командою `diskmap`.

Тест 1. Порівняти точність конформного відображення типу (1), яке відображає одиничний круг на зірку (рис. 1) [3, С. 191], коли параметри відображення знаходяться за методами, які описані в роботах [1] та [2]. Для проведення розрахунків вважати, що $OA_v = 0{,}5$; $OB_v = 1$ $v = \overline{1;5}$.

Розв'язання. В табл. 1 наведені координати вершин багатокутника у формі зірки w_k та їх образів на одиничному колі, які обчисленні за допомогою пакета SC Toolbox. Значення параметра C визначається автоматично, і в цьому разі становить C = 0,34001064 + 0,46798447i. Значення параметра A, яке відповідає точці, в яку відображається центр круга, встановлюється командою `center` і в даному випадку дорівнює нулю.

Точність побудованого пакетом SC Toolbox прямого конформного відображення одиничного кола на внутрішність зірки становить $9{,}95 \cdot 10^{-9}$.

Окремо відзначимо, що додатково можна здійснити поворот системи координат на комплексній площині w, наприклад, так , щоб вершина B_1 та її образ на границі круга мали однакові координати на обох комплексних площинах.

Таблиця 1. Параметри прямого конформного відображення (1) одиничного круга на зірку

i	w_k	z_k	α_k
1	$0{,}0000 + 1{,}0000 \cdot i$	$0{,}8090 + 0{,}5878 \cdot i$	0,2919
2	$-0{,}2939 + 0{,}4045 \cdot i$	$0{,}3090 + 0{,}9511 \cdot i$	1,3081
3	$-0{,}9511 + 0{,}3090 \cdot i$	$-0{,}3090 + 0{,}9511 \cdot i$	0,2919v
4	$-0{,}4755 - 0{,}1545 \cdot i$	$-0{,}8090 + 0{,}5878 \cdot i$	1,3081
5	$-0{,}5878 - 0{,}8090 \cdot i$	$-1{,}0000 + 0{,}0000 \cdot i$	0,2919
6	$0{,}0000 - 0{,}5000 \cdot i$	$-0{,}8090 - 0{,}5878 \cdot i$	1,3081
7	$0{,}5878 - 0{,}8090 \cdot i$	$-0{,}3090 - 0{,}9511 \cdot i$	0,2919
8	$0{,}4755 - 0{,}1545 \cdot i$	$0{,}3090 - 0{,}9511 \cdot i$	1,3081
9	$0{,}9511 + 0{,}3090 \cdot i$	$0{,}8090 - 0{,}5878 \cdot i$	0,2919
10	$0{,}2939 + 0{,}4045 \cdot i$	$1{,}0000 + 0{,}0000 \cdot i$	1,3081

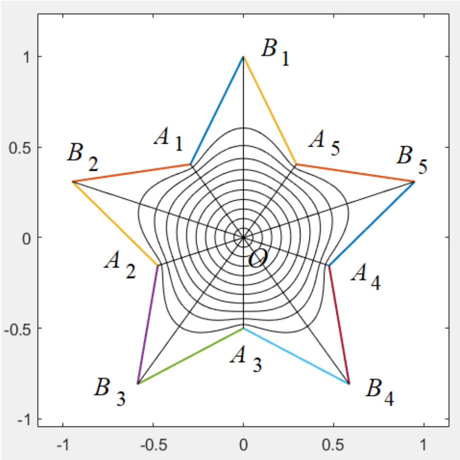

Рисунок 1. Багатокутник у формі зірки

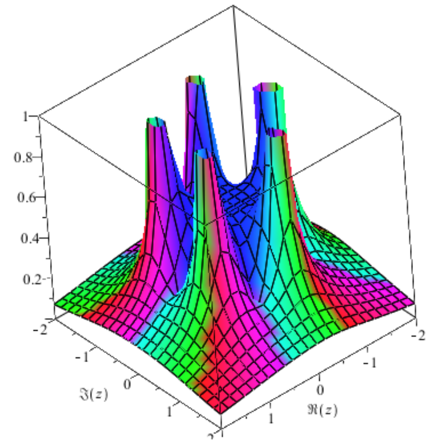

Рисунок 2. Графік функції $\left|F^{/}(z)\right|$ з параметрами з табл. 1

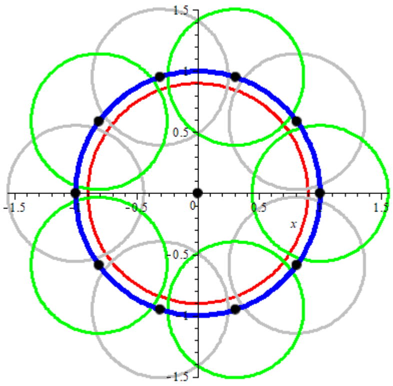

Рисунок 3. Околи точок

Для реалізації другого алгоритму обмежимося використанням двох околів у кінцевих точках відрізку інтегрування $[0;z]$. Можливі сполучення околів показані на рис. 3. Множинність способів розв'язання досліджуваної задачі примножується тим, що більшість точок круга можна віднести одночасно до кількох околів, які показано на рис. 3 (оскільки ці околи перетинаються), а також утворити навколо точки її власний окіл.

При використанні 7 доданків у розвиненні в степеневі ряди в обох околах найбільша абсолютна похибка не перевищує $3{,}0\cdot 10^{-3}$.

Очевидно цей результат може бути покращений за рахунок збільшення кількості околів та підбору точок «стикування» околів. Використання трьох околів приводить до зменшення абсолютної похибки до $1{,}6\cdot 10^{-5}$ у метриці *C*.

Висновок. Розглянуті задачі сприяють коректному застосуванню студентами пакетів прикладних програм, які реалізують наближені методи теорії функцій комплексного змінного та усвідомленню обмежень, які існують при застосуванні цих методів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Driscoll, T. A., & Trefethen, L. N. (2002). Schwarz–Christoffel Mapping. Cambridge: Cambridge University Press.

2. Боголюбский А. И., Скороходов С. Л., & Христофоров Д. В. (2005) Быстрое вычисление эллиптических интегралов и их обобщений. Журнал вычислительной математики и математической физики. 45, 11, 1938–1953.

3. Лаврентьев, М. А., & Шабат, Б. В. (1987) Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.