

**ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ФОРМА ЗАКОНА АМПЕРА Й ЗАДАВНЕНА
НЕУЗГОДЖЕНІСТЬ КЛАСИЧНОЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

Вступ

Дослідження електромагнетних взаємодій почато понад двісті років тому Фарадеєм, Ампером, Біо й ін. Було ретельно досліджено характерні випадки взаємодії провідників зі струмом і джерелами магнетного поля. 1826 вийшла книга Ампера «Електродинаміка» [2] з підзаголовком «Теорія електродинамічних явищ, виведена виключно з дослідів». Ампер навів досліди, ним виконані, послався на досліди Фарадея й навів формулу силової взаємодії елементів провідників як результат аналізу тих дослідів. По смерті Ампера фізики прийняли іншу формулу – формулу Грассманна, яку називають зараз законом Ампера. Та, дивна річ, майже двісті років електродинаміка не може пояснити досліди самого Ампера й Фарадея. Ці досліди фізики не заперечують, проте пояснити їх не можуть: досліди демонструють наявність магнетного поля в аксійнім напрямку провідника, що суперечить закону Біо-Савара. Ще дивніший напрямок магнетної сили – провідники відштовхуються, маючи однаковий напрямок струмів.

Останніми роками радіолюбители здійснюють радіозв'язок так званими Е-Н антенами, що висилають і приймають радіохвилі в аксійнім напрямку провідників. Обґрунтувати можливість такого радіозв'язку сучасна теорія магнетного поля неспроможна.

Як і чому склалася така ситуація? Чому відомі десятки так званих «парадоксальних експериментів», які сучасна електродинаміка пояснити не може? Чому наукові праці й підручники з електродинаміки містять приклади порушення принципу рівності сил дії й протидії в магнетних взаємодіях провідників, тобто порушення третього закону Ньютона [3, с.203]).

Тут заналізовано причини зазначених проблем електродинаміки й коректність сучасної теорії магнетного поля.

1. МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИХ СИЛОВИХ ВЗАЄМОДІЙ

Двісті років тому, коли можливості дослідження електромагнетних силових взаємодій були вельми обмежені, важливу роль у їхнім вивченні відігравали модельні уявлення про ці взаємодії. Модель Ампера визнавала взаємодію лише центральними силами: «закони (електродинамічних явищ) мають бути єдиною підставою для виводу формули, що визначає елементарні сили, напрямок яких конче збігається з напрямком прямої, що з'єднує дві матеріальні точки, між якими діють сили» [2, с.10].

Інакше уявляв собі модель взаємодії Ерстед [4]. Ампер [2, с. 438] цитує цю роботу: «виконані спостереження (взаємодія провідника зі струмом і магнету) дозволяють висновок, що цей конфлікт створює вихор навколо дроту». Інші фізики, наприклад, Біо, вважали, що взаємодію реалізує пара нецентральных паралельних сил дії й протидії, прикладена до джерела сили відповідно до третього закону Ньютона. Та пара сил створює обертовий момент, що відповідало припущенню Ерстеда.

Ампер обґрунтував свою модель дослідями. В [2, с. 43] наведено дослід, в яким металева рамка зі струмом ABCDE рухається в ртуті відштовхуванням в аксійнім напрямку провідників АВ і ED (Рис.1).

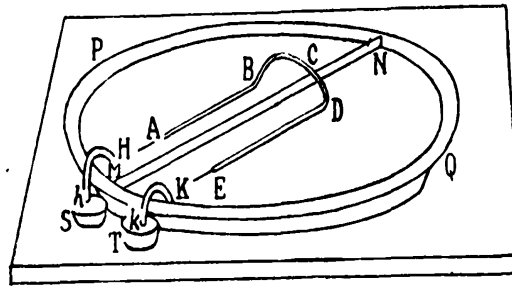


Рис.1.

PQ – скляна посудина, розділена перегородкою MN на дві камери, заповнені ртуттю. ABCDE – мідний ізолюваний провідник, що плаває в ртуті. Неізолювані кінці провідника А й Е торкаються ртуті. S і T – контакти, на які подано напругу.

Ампер [2, с. 300] згадує експеримент Фарадея з подібним результатом: «сила відштовхування, що діє на підвішений вертикально дуже тонкий провідник, нижній кінець якого занурений у ртуть». Фарадей описав цей експеримент у [5, с. 224]. Дослід здійснено з одним провідником і з рамкою з двох вертикальних паралельних провідників, кінці яких занурено у ртуть. Обидва провідники рамки відштовхувано від поверхні ртуті, хоча струми в них були протилежні. Фарадей так описує дослід: «коли я замикав... гальванічний прилад, провідники підіймалися зі ртуті на висоту одного дюйма; вони опускалися знову, коли з'єднання розмикали». Досліди довели наявність акційних магнетних сил у взаємодії провідників зі струмом. Найбільше дивував напрямок сил: провідники відштовхувалися за однакового напрямку струму в провіднику та його продовженні в ртуті.

Коректність тих дослідів незаперечна. Дослід Ампера з рамкою згадує Максвелл [6, с.319], який пояснив його тим, що на замкнених контурах формули Ампера й Грассманна дають однакові результати. А що дослід Ампера містить замкнений контур, то Максвелл вважав опис його формулою Грассманна також коректним.

Як, на думку Максвелла, формула Грассманна пояснює дослід з рамкою, адже згідно з нею взаємодію здійснюють лише сили, ортогональні до вісі провідників? Єдино можливий варіант – рух рамки BCDE «незрівноваженими» діями провідника BCD на провідники AB й DE. Ці провідники скріплені, тому рамку рухає дія *власного* магнетного поля.

Ідею можливого руху провідників власним магнетним полем опрацював Р. Г. Сігалов [7], навівши десятки дослідів, багато з яких виконав сам, у яких провідники зі струмом рухає дія «незрівноважених сил власного магнетного поля.» Чи можливий рух провідника власним магнетним полем, розглянемо нижче.

Паппас наводить виконаний власноруч 1980 р. варіант цього експерименту (рис. 3) [8, с. 93]. Рамку зроблено з легкої алюмінієвої трубки діаметром 2 мм вагою 38.2 г. Довжина рамки 2 м, ширина 1.5 м. Рамку підвішено на тонких дротах, що не заважає їй легко рухатися горизонтально. Кінці рамки торкаються поверхні ртуті в двох невеликих чашах B і E, на які подано напругу провідниками A і F. З виником струму рамка рушає вперед зі швидкістю 2 см/с, поки кінці рамки торкаються ртуті.

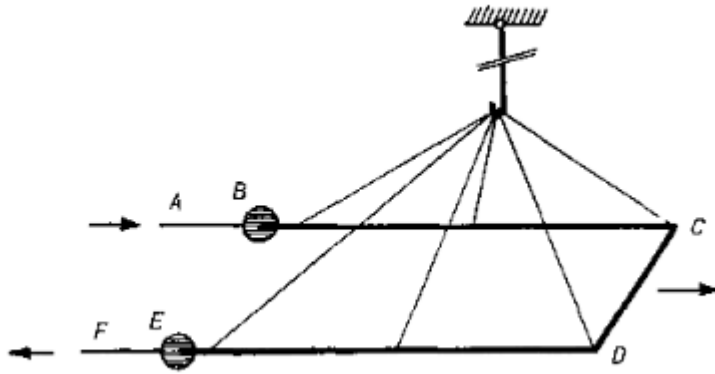


Рис.2. Експеримент Паппаса з рамкою.

Паппас заперечує Максвелла: «твердження Максвелла про ідентичність обох законів має сенс лише, коли dl_1 не є частина контура l_2 . Коли dl_1 є частина контура l_2 , твердження Максвелла неправильне». Дійсно, експерименти Ампера й Фарадея це експерименти магнетної взаємодії провідників одного контура.

Формула Ампера взаємодії елементів провідників у сучасних позначеннях має вигляд

$$\bar{F}_{12} = (1 - 1)$$

де F_{12} – сила дії елемента dl_1 провідника 1 зі струмом I_1 на елемент dl_2 провідника 2 зі струмом I_2 , r_{12} – радіус-вектор, що сполучає центри елементів провідників.

Це формула взаємодії центральними силами, що не порушує закону збереження енергії: сила дії дорівнює силі протидії. Формула Ампера пояснює досліди Ампера й Фарадея. Та формулу Ампера заперечують інші досліди – дія поля сталого магнета на провідник, де магнетна сила нецентральна – вона ортогональна до вісі провідника.

Суперечки фізиків тривали, доки Грассманн 1845 р. в [9] запропонував формулу взаємодії елементів провідників

$$(1 - 2)$$

де F_{12} – сила дії елемента dl_1 провідника 1 зі струмом I_1 на елемент dl_2 провідника 2 зі струмом I_2 , r_{12} – радіус-вектор, що сполучає центри елементів провідників.

Дещо інший вигляд цієї формули називають законом Ампера:

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[d\bar{l}_2 \bar{B} \right],$$

де B – індукція магнетного поля замкненого контура провідника l_1 :

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi l_1} \oint \frac{[d\bar{l}_1 \bar{r}]}{r^3}.$$

Формула Грассманна взаємодії елементів провідників і формула закону Ампера дії замкненого контура на елемент провідника порушують закон збереження енергії: сила дії не дорівнює силі протидії. Саме тому закон Ампера визначає дію лише замкненого контура на елемент провідника, а не навпаки. Тамм пояснює так: «у межах вивчення замкнених сталих струмів сила взаємодії елементів струмів не може бути визначена однозначно.» [3, с.204].

Досліди Ампера й Фарадея лишилися поза увагою сучасної теорії магнетного поля, схоже, тому, що Ампер вийшов за межі вивчення взаємодій замкнених сталих струмів. Сучасна електродинаміка двісті років по тому ці межі не переходить.

2. ВІДНОСНІСТЬ СИЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ НЕЙТРАЛЬНИХ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМОМ

Рух елемента нейтрального провідника зі струмом створює магнетне поле, що є сумою полів позитивних і негативних зарядів:

$$\vec{H} = \frac{1}{cr^3} \left(Q^+ [\vec{V}_1 \vec{r}] - Q^- [\vec{V}_2 \vec{r}] \right),$$

де $\vec{V}_1$ і $\vec{V}_2$ – швидкості позитивних і негативних зарядів в елементі провідника, Q^+ і Q^- – кількості позитивних і негативних зарядів в елементі провідника. А що в нейтральному провіднику ці величини однакові, останній вираз набуде вигляду

$$\vec{H} = \frac{Q^+}{cr^3} \left[(\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \vec{r} \right].$$

Різницю швидкостей позитивних і негативних зарядів у провіднику визначає лише струм у провіднику, тобто, рух провідника з квазістатичними швидкостями не змінює його магнетне поле. Отже, магнетна взаємодія двох елементів провідників визначається лише *відносним* переміщенням провідників і не залежить від вибору системи відліку.

Магнетна сила виконує роботу, якщо елемент провідника рухається дією іншого елемента – джерела сили. Якщо рухається джерело сили, а перший елемент нерухомий, це теж відносне переміщення. Яка ж сила виконує роботу в цім випадку? Сила протидії. Так, саме сила протидії. Та чи враховує формула Грассманна сили протидії в наведених вище дослідях?

Наголосімо особливості *відносної* силової взаємодії елементів провідників: обов'язкова наявність пари сил дії-протидії – виконання третього закону Ньютона. Маємо ще один висновок: *рух нейтрального провідника зі струмом дією власного магнетного поля неможливий, бо внаслідок такого руху магнетне поле провідника не змінюється.*

А як же досліди Сігалова? Довіряючи коректності формули Грассманна, Сігалов не гадав, що чинні сили в його дослідях були *аксійні* магнетні сили, не перевіряв наявності протидії й дійшов висновку про можливість руху провідників власним магнетним полем.

Розгляньмо, якій моделі взаємодії відповідає вираз Грассманна й чому цей вираз заперечує можливість аксійних магнетних взаємодій.

3. МАГНЕТНЕ ПОЛЕ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМОМ

Вийдемо за межі взаємодій замкнених струмів – визначимо, чому формула Грассманна взаємодії *елементів провідників* порушує принцип рівності сил дії-протидії. Наведімо вирази сил, що діють на елементи двох провідників згідно до формули Грассманна:

$$\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left[d\vec{l}_2 \left[d\vec{l}_1 \vec{r}_{12} \right] \right]; \quad \vec{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left[d\vec{l}_1 \left[d\vec{l}_2 \vec{r}_{21} \right] \right]. \quad (3-1)$$

Тут наявні аксійні вектори, так звані «псевдовектори». Саме таким аксійним вектором є проміжний результат обчислення – вектор магнетної індукції $\vec{B}$:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r^3} \left[d\vec{l}_1 \vec{r}_{12} \right]; \quad \vec{B}_2 = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi r^3} \left[d\vec{l}_2 \vec{r}_{21} \right].$$

Через псевдовекторність магнетна сила завжди ортогональна вісі провідника. Отже, сучасна теорія магнетного поля не може пояснити досліди Ампера й Фарадея.

Подавши магнетні сили полярними векторами й застосувавши знану формулу

$$[\vec{a}[\vec{b}\vec{c}]] = \vec{b}(\vec{a}, \vec{c}) - \vec{c}(\vec{a}, \vec{b}),$$

маємо

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(d\bar{l}_1 (d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) - \bar{r}_{12} (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) \right); \bar{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(d\bar{l}_2 (d\bar{l}_1, \bar{r}_{21}) - \bar{r}_{21} (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) \right).$$

(3 – 2)

Результат нетривіальний: магнетна сила має дві складові. Згадаймо теорему Гельмгольца: довільне векторне поле можна подати сумою потенціального й *соленоїдального* полів.

Другі доданки в наведених формулах, вочевидь, є сили потенціального поля. Вони центральні, рівні за величиною й протилежні за напрямком. Ці сили водночас сили дії – протидії. Закон збереження енергії для сил потенціального поля справджується: сила дії дорівнює силі протидії. Ці сили подібні силам електричного поля – кулоновим силам, але мають протилежний напрям.

Перші доданки, відповідно до теореми Гельмгольца, є сили двох *соленоїдальних* полів. Це дві різні за величиною й напрямком сили. Вони, вочевидь, не є сили дії–протидії. Взаємодія цими силами мала б відповідати моделі Біо: кожна з цих сил викликає появу сили протидії, яка діє на джерело сили.

Перепишімо вирази (3 – 2) у вигляді:

$$\bar{F}_{12} = \bar{F}_{12s} + \bar{F}_{12p} = U_{s1} I_2 (d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) + U_{p1} I_2 (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2),$$

де

$$\bar{U}_{s1} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r^3} d\bar{l}_1, \quad U_{p1} = - \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r^3} \bar{r}_{12}.$$

Називатимемо U_s *соленоїдальною індукцією* магнетного поля, U_p – потенціальною.

Визначмо дивергенцію індукції U_p магнетного поля. Потік Φ_p вектора потенціальної індукції через поверхню сфери радіуса r дорівнює

$$\Phi_p = \oint_s \frac{-\mu_0 I_1}{4\pi r^3} \bar{r} ds = - \mu_0 I_1.$$

Для визначення дивергенції потенціальної індукції поділимо потік Φ_p на об'єм сфери:

$$\text{div} \bar{U}_p = - \mu_0 \rho,$$

де ρ – об'ємна густина струму в об'ємі сфери. Другі доданки в виразах (3-42) є дійсно сили потенціального поля, дивергенція якого відмінна від нуля.

Потік вектора індукції U_s магнетного поля через довільну замкнену поверхню вочевидь дорівнює нулю, бо інтеграл антисиметричний. Дивергенція дорівнюватиме нулю, тому перші доданки дійсно є складові магнетної сили соленоїдального поля.

В класичній електродинаміці вважається, що магнетне поле є соленоїдальним полем, дивергенція його дорівнює нулю [3, с. 220]. Ми проаналізували формулу Грассманна, щоб зробити власні висновки. Чому ж наші висновки так радикально різняться? Ми аналізували дію полярних силових векторів магнетного поля, тобто реальних фізичних векторів. Класична електродинаміка за головну характеристику магнетного поля бере аксійний псевдовектор магнетного поля $\mathbf{B}$. Тому реальними властивостями магнетного поля вважають властивості поля псевдовектора $\mathbf{B}$. Ми трактуємо це таким чином: *поле вектора магнетної індукції $\mathbf{B}$ має соленоїдальний характер. Реальне фізичне магнетне поле має інші властивості, ніж поле вектора магнетної індукції $\mathbf{B}$.*

Доведімо, що коректні саме наші висновки: реальне магнетне поле це два окремі поля – потенціальне й соленоїдальне, які діють незалежно на заряди, що рухаються, єдиного

магнетного поля не існує. Та повернімося до закону Ампера, зрозуміймо чому формула Грассманна порушує третій закон Ньютона.

4. СИЛИ ПРОТИДІЇ В ЗАКОНІ АМПЕРА

Повернімося до розгляду моделей магнетних взаємодій, згаданих у Розділі 1. Модель Ампера взаємодії центральними силами відповідає взаємодіям потенціального поля. Цим взаємодіям притаманно те, що сили дії–протидії розташовані вздовж прямої і сила дії одного об'єкта на другий є одночасно силою протидії другого об'єкта на перший.

В моделі Біо взаємодія нецентральними активними силами відбувається парою сил протилежних напрямків: активна нецентральна сила зрівноважується антипаралельною силою протидії.

Звернімося до формули Грассманна й до формул (3 – 2). Вочевидь, потенціальні складові сил відповідають моделі Ампера. *Соленоїдальні* складові моделі Біо не відповідають, тому що відсутні сили протидії. Якщо наші висновки правильні, то чому є коректний закон Ампера у формі Грассманна?

Наведемо формулу закону Ампера, використовуючи полярні вектори:

$$\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{(\vec{dl}_1 (\vec{dl}_2, \vec{r}_{12}) - \vec{r}_{12} (\vec{dl}_1, \vec{dl}_2))}{r^3}. \quad (4 - 0)$$

В цій формулі сили протидії відсутні. Щоб визначити, чому формула коректна, виведемо формулу сили дії $\vec{F}_{2l}$ елемента провідника на замкнений контур. Закон Ампера є коректним, тому третій закон Ньютона він не порушує. Щоб отримати вираз сили $\vec{F}_{2l}$, що має ту ж величину але протилежна за напрямком, досить в останній формулі лише змінити на протилежний напрямок радіус-вектора $\vec{r}$:

$$\vec{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{(\vec{dl}_1 (\vec{dl}_2, \vec{r}_{21}) - \vec{r}_{21} (\vec{dl}_1, \vec{dl}_2))}{r^3} \quad \vec{F}_{21} = - \vec{F}_{12}.$$

За допомогою полярних векторів ми дістали формулу дії *елемента* провідника на замкнений контур, яка сучасній електродинаміці невідома. Чому в цій формулі відсутні соленоїдальні складові дії *елемента провідника* на замкнений контур? Можлива причина та, що сумарна сила дії соленоїдальної складової елемента провідника на замкнений контур дорівнює нулю:

$$\vec{F}_{21s} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{\vec{dl}_2 (\vec{dl}_1, \vec{r}_{12})}{r_{12}^3} = 0, \quad (4 - 1)$$

Доведемо це. Враховуючи, що

$$\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}^3} = - \operatorname{grad} \left(\frac{1}{r_{12}} \right),$$

а величина цього градієнта в напрямку $d\vec{l}_1$ дорівнює

$$\operatorname{grad}_{d\vec{l}_1} \left(\frac{1}{r_{12}} \right) = \left(\vec{dl}_1, \operatorname{grad} \left(\frac{1}{r_{12}} \right) \right),$$

визначмо значення інтегралу соленоїдальної складової сили дії елемента $d\mathbf{l}_2$ на контур l_1 :

$$\oint_{l_1} \frac{d\bar{l}_2(d\bar{l}_1, \bar{r}_{12})}{r_{12}^3} = - d\bar{l}_2 \oint_{l_1} \left(d\bar{l}_1, \text{grad} \left(\frac{1}{r_{12}} \right) \right) = - d\bar{l}_2 \oint_{l_1} \frac{\partial \left(\frac{1}{r_{12}} \right)}{\partial l_1} d\bar{l}_1 = 0$$

Інтеграл по замкнутому контуру дорівнює нулю, бо інтегранд є повний диференціал. Це означає, що і сумарна протидійна сила контура l_1 на елемент контура $d\mathbf{l}_2$ також дорівнюватиме нулю. Ми визначили причину, чому закон Ампера є коректним, хоч він і використовує формулу Грассманна.

Другою особливістю формули (4 – 1) є наявність соленоїдальних складових дії замкнутого контуру l_1 на елемент $d\mathbf{l}_2$, які мають вже протилежний напрямок. Ці складові є сили *протидії* елемента провідника $d\mathbf{l}_2$ на замкнений контур l_1 . Маємо підтвердження, що в законі Ампера взаємодія соленоїдальних складових дійсно відповідає моделі Біо: на елемент (джерело сили) діє сила протидії, що має ту ж величину, але протилежний напрямок.

Щоб формули (3 – 2) були коректні й відповідали моделі Біо, треба додати силу протидії активній складовій соленоїдального поля:

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(d\bar{l}_1(d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) - \bar{r}_{12}(d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) - d\bar{l}_2(d\bar{l}_1, \bar{r}_{21}) \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(d\bar{l}_1(d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) - \bar{r}_{12}(d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) + d\bar{l}_2(d\bar{l}_1, \bar{r}_{21}) \right) \quad (4 - 2)$$

$$\bar{F}_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(-\bar{r}_{21}(d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) + d\bar{l}_2(d\bar{l}_1, \bar{r}_{21}) + d\bar{l}_1(d\bar{l}_2, \bar{r}_{21}) \right).$$

Ми дістали коректні вирази силової взаємодії елементів провідників, які задовольняють третьому закону Ньютона:

$$\bar{F}_{12} = -\bar{F}_{21}.$$

У наведених виразах елементи провідників взаємодіють центральними силами потенціальних складових і парами сил дії – протидії соленоїдальних складових магнетних сил. Соленоїдальна протидія *аксійна*, вона ортогональна силі Грассманна. Сили взаємодії елементів провідників $\mathbf{F}_{12}$ і $\mathbf{F}_{21}$ *не ортогональні вісі провідника й можуть мати довільний напрямок*. Ці сили антипаралельні й мають однакову величину. На рис. 4 наведено магнетні сили взаємодії двох елементів провідників.

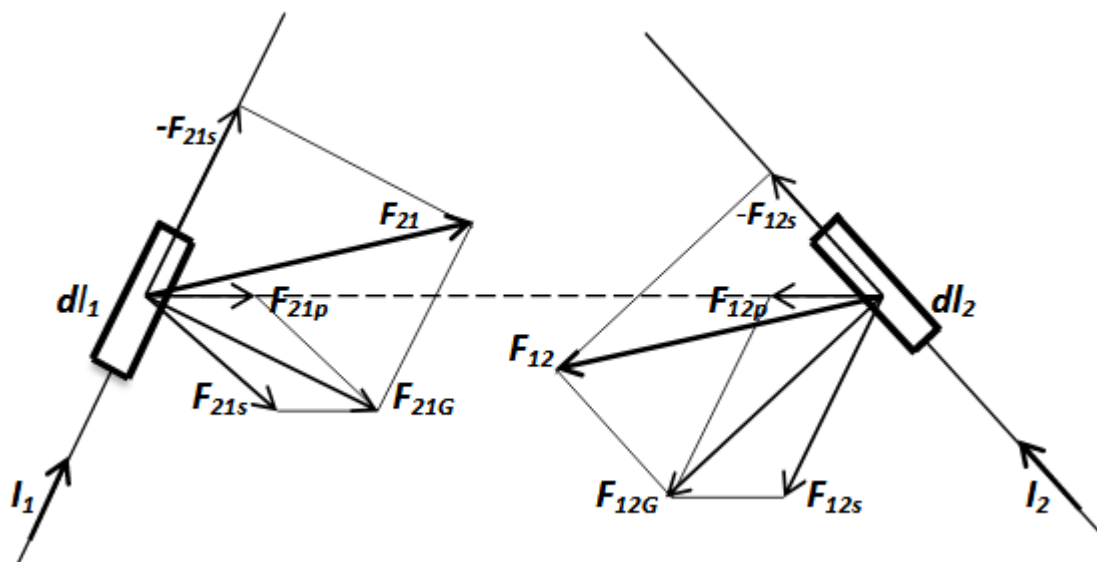


Рис. 3. Магнетна взаємодія елементів провідників з урахуванням протидії

Вирази (4-2) свідчать, що у взаємодії реально беруть участь три окремі магнетні поля: два соленоїдальні поля кожного елемента провідника й спільне потенціальне поле.

Аналіз виразів (4-1) дозволяє зробити висновок: формули Грассмана взаємодії елементів провідників некоректні, бо нехтують факт, що сили потенціального й соленоїдального поля мають різні механічні моделі. Використання аксійного вектора магнетної індукції $\mathbf{B}$, норма якого є векторна сума потенціальної й соленоїдальної складових, призводить до неможливості врахування сил протидії соленоїдальних складових.

Вирази (4 – 2), що ми дістали з умов виконання закону збереження енергії, вперше навів 1910 р. видатний англійський фізик і математик Віттекер – ([10] стор. 91).

Віттекер зазначив, що його формула відповідає принципу рівності сил дії – протидії для взаємодії елементів провідників, та, визначаючи силу дії замкнутого контура I_1 на елемент контура dl_2 , можна скористатися скороченим її варіантом, що відповідає формулі Грассманна.

Проте Віттекер не наголосив, що формула Грассманна некоректно визначає силу дії елемента провідника на замкнений контур, порушуючи принцип рівності сил дії – протидії.

В разі взаємодії двох замкнутих контурів дорівнюватимуть нулю складові непотенціальних сил провідників обох контурів і відмінні від нуля будуть лише центральні сили. В цім разі формула сили спрощується:

$$\overline{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi l_1 l_2} \oint \oint \frac{-\bar{r}_{12} (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2)}{r_{12}^3}.$$

Тобто взаємодія замкнутих контурів відбувається виключно потенціальними складовими магнетних сил, що суперечить положенням сучасної електродинаміки про вихоровість магнетного поля.

Наведімо формули закону Ампера для різних варіантів взаємодій.

1. Взаємодія елементів провідників – формула Віттекера:

$$\overline{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(-\bar{r}_{12} (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) + d\bar{l}_1 (d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) + d\bar{l}_2 (d\bar{l}_1, \bar{r}_{12}) \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(\left[d\bar{l}_2 \left[d\bar{l}_1 \bar{r}_{12} \right] \right] + d\bar{l}_2 (d\bar{l}_1, \bar{r}_{12}) \right).$$

Ця формула коректна для визначення взаємодії *елементів* провідників, тому її можна стосувати до всіх випадків взаємодії. *Лише цю формулу* слід брати для визначення сил взаємодії ділянок провідників одного контура. Формулу Віттекера можна спростити, якщо у взаємодії бере участь замкнений контур (контури).

2. Дія замкнутого контура I_1 на елемент провідника 2 – формула Грассманна, закон Ампера:

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{-\bar{r}_{12}(\bar{dl}_1, \bar{dl}_2) + \bar{dl}_1(\bar{dl}_2, \bar{r}_{12})}{r_{12}^3} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \frac{[\bar{dl}_2[\bar{dl}_1, \bar{r}_{12}]]}{r_{12}^3}.$$

3. Дія елемента провідника контура l_1 на замкнений контур l_2 :

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_2} \frac{-\bar{r}_{12}(\bar{dl}_1, \bar{dl}_2) + \bar{dl}_1(\bar{dl}_2, \bar{r}_{12})}{r_{12}^3}.$$

Наголосімо, що ця формула не є формула Грассманна, бо друга її складова є сила протидії силі дії елемента контура dl_2 на елемент dl_1 .

4. Взаємодія замкнених контурів I_1 та I_2 :

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{-\bar{r}_{12}(\bar{dl}_1, \bar{dl}_2)}{r_{12}^3}.$$

5. АКСІЙНІ МАГНЕТНІ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОВІДНИКІВ

Перевірмо коректність формул Віттекера (4 – 42) на дослідах Ампера й Фарадея, які засвідчують наявність аксійних магнетних сил. Розгляньмо взаємодію елемента dl_1 прямолінійного провідника зі струмом I_1 з елементом dl_2 продовження цього провідника в ртуті (Рис. 5). Вважаємо, що AO – металева частина провідника, OB – продовження провідника в ртуті.

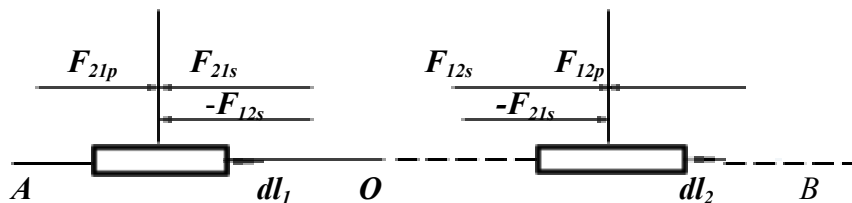


Рис. 4. Взаємодія елемента провідника dl_1 зі струмом I_1 та елемента продовження цього провідника в ртуті dl_2 .

Визначмо сили взаємодії елементів провідників спочатку за формулою Грассманна (3 – 2):

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi r^3} \left(-\bar{r}_{12}(\bar{dl}_1, \bar{dl}_2) + \bar{dl}_1(\bar{dl}_2, \bar{r}_{12}) \right).$$

Потенціальна F_{12p} і соленоїдальна F_{12s} складові сил мають однакові величини і зрівноважують одна одну, бо їхні напрямки протилежні. Закон Біо-Савара визначає сумарну дію потенціальної і соленоїдальної складових магнетних сил, тому магнетна індукція в аксійнім напрямку провідника дорівнює нулю. Тобто, сумарна чинна сила дорівнює нулю, яка ж протидійна сила може виникнути в такому випадку? Якщо вважати, що дві окремі складові

магнетної сили є лише математична абстракція, протидійна сила в аксійнім напрямку має дорівнювати нулю. Досліди Фарадея, Ампера й інших дослідників це заперечують. А може річ у тім, що взаємодія в цих дослідах відбувається в ртуті й результати дослідів є наслідок електролітичної реакції в ртуті?

Розгляньмо простий пристрій, наведений у роботі Ніколаєва [11, стор.43]: ротор – кільцевий провідник зі струмом I – обертається в магнетнім полі двох напівкруглих соленоїдів (рис.6). Струм до ротору подають ковзними металевими контактами.

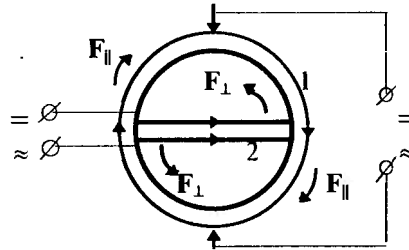


Рис.5. Мотор Ніколаєва.

Кільцевий провідник – ротор двигуна – може обертатися лише аксійними магнетними силами. Цей приклад доводить, що й у разі металевих контактів аксійні сили працюють.

Повернімось до розгляду взаємодії на рис.5. Використаймо формулу Віттекера

$$\bar{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^3} \left(-\bar{r}_{12} (d\bar{l}_1, d\bar{l}_2) + d\bar{l}_1 (d\bar{l}_2, \bar{r}_{12}) + d\bar{l}_2 (d\bar{l}_1, \bar{r}_{12}) \right).$$

В аксійнім напрямку, де всі три вектори паралельні, на кожний елемент провідника діють три рівні за модулем сили: потенціальна складова, соленоїдальна складова й сила протидії власній соленоїдальній складовій дії другого елемента провідника на перший. Потенціальна й соленоїдальна складові зрівноважують одна одну, чинною лишається сила протидії – сила відштовхування (остання складова в наведеній формулі).

Результат суперечить визнаній теорії: *елементи провідників з однаковим напрямком струмів відштовхуються*. Чинна сила є сила *протидії* соленоїдальної складової магнетного поля.

Аналогічний результат дістаємо, визначивши силу дії елемента $d\bar{l}_2$ на елемент $d\bar{l}_1$: елементи провідників відштовхуються, якщо напрямки струмів збігаються. Зміна напрямку струму не змінює напрямків дії магнетних сил, тому й у цім разі елементи провідників відштовхуються, що й підтверджують вищенаведені експерименти Фарадея і Ампера. Формула Віттекера коректно описує ці експерименти. Додамо: коли струми в елементах провідників течуть антипаралельно, вони притягаються.

Результати аналізу наведених експериментів доводять: потенціальні й соленоїдальні складові магнетних сил існують реально та діють незалежно. Саме тому в аксійнім напрямку соленоїдальна складова, хоч і зрівноважена потенціальною складовою, створює свою протидійну силу.

Щоб мати уявлення про порядок величин цих сил, визначмо сили, що виникають у провіднику, коли струм у ній досягає величини, наприклад, 1000 ампер. Визначимо силу, з якою прямолінійний провідник з таким струмом довжиною 1 м діє на своє продовження тієї ж довжини. Для цього потрібно визначити мінімальну віддаль між провідником і його продовженням, бо для нульового значення дістанемо нескінченність. Визначмо середню мінімальну віддаль, ґрунтуючись на концентрації n_0 електронів у мідному провіднику

$$n_0 = k \frac{N_A D}{A}, \quad n_0 = 2 \frac{6.02 \times 10^{23} \times 8.96 \times 10^{23}}{63.546} = 0.16976 \times 10^{30} \text{ м}^{-3}.$$

де k – валентність металу, N_A – число Авогадро, D – густина металу провідника, A – атомова вага. Виходячи з величини концентрації, визначмо середню віддаль a між електронами:

$$a = \frac{1}{\sqrt[3]{n_0}} = 1.806 \times 10^{-10} \text{ м.}$$

Наведімо вираз для магнетної сили:

$$\overline{F}_{12} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_{x_2=0}^{x_2=-b} \int_{x_1=a}^{x_1=b} \frac{dx_2 dx_1}{(x_1 - x_2)^2},$$

де від $x=a$ до $x=b$ відрізок провідника, від $x=0$ до $x=-b$ відрізок його продовження. Від $x=0$ до $x=a$ – віддаль між умовним кінцем провідника й початком його продовження.

З урахуванням формул

$$\int \frac{dx}{(x-c)^2} = \frac{-1}{x-c}; \quad \int \frac{dx}{c-x} = -\ln(c-x); \quad \int \frac{dx}{x-c} = \ln(x-c),$$

вираз для сили F_{12} матиме вигляд:

$$\overline{F}_{12} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_{x_2=-b}^{x_2=0} \int_{x_1=a}^{x_1=b} \frac{dx_2 dx_1}{(x_1 - x_2)^2} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_{x_2=-b}^{x_2=0} \left(-\frac{1}{b-x_2} + \frac{1}{a-x_2} \right) dx_2 = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} ((\ln b - \ln 2b) - (\ln a - \ln b)) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} (\ln \frac{b}{a} - \ln 2) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{b}{2a}$$

Для струму 1000 а і довжини провідників 1м сила дорівнює 23.128н, для 10м – 24.044н.

6. ЗАКОН БІО-САВАРА

Закон Біо-Савара в електродинаміці трактують як такий, що заперечує можливість акційної взаємодії елементів провідників і зарядів, що рухаються. Та слід врахувати важливі властивості цього закону, що оперує сумою потенціальних і соленоїдальних складових магнетного поля внаслідок використання математичного апарату акційних векторів магнетної індукції, що призводить до неможливості опису сил протидії в магнетній взаємодії. Тому закон ураховує дії лише *активних* магнетних сил і нехтує сили протидії.

Виділення в магнетнім полі потенціальної й соленоїдальної складових дозволяє висловити припущення про їхню фізичну природу. Соленоїдальна складова є наслідок руху електричного поля електронів у провіднику. Якщо електрон другого провідника, на який діє це поле, наближається (віддаляється) вздовж радіус-вектора, тобто рухається ортогонально фронту електричного поля, на нього діє найбільша сила відштовхування (притягання). Коли електрон рухається ортогонально до радіус-вектора, тобто паралельно руху поля, непотенціальна сила на нього не діє.

Потенціальна складова «антикулонова». Вона направлена проти сили Кулона, зрівноважує частину цієї сили. Пояснимо істотню різницю між кулоною й «антикулоною» силами: модуль кулонової не залежить від швидкості зарядів – об'єктів взаємодії, модуль «антикулонової» є функція швидкостей цих зарядів.

Розберімо дію потенціальної й соленоїдальної складових магнетних сил. Потенціальна складова є сила притягання з модулем, незалежним від напрямку радіус-вектора. Соленоїдальна складова є акційна сила відштовхування з модулем, пропорційним проєкції елемента провідника на радіус-вектор. В ортогональному напрямку до вісі провідника вона дорівнює нулю, в акційнім напрямку дорівнює потенціальній складовій, діючи супротивно. Отже, в акційнім напрямку сума обох складових дорівнює нулю. Сила протидії власній соленоїдальній складовій теж акційна.

З'ясуємо, як працюють згадані у вступі Е-Н антени.

У [12] описано експеримент зв'язку двох звичайних серійних УКВ радіостанцій «Беркут 603», в яких штиркові висильна й приймальна антени розташовані вздовж прямої.

Котушка приймальної антени розташована всередині суцільного мідного циліндричного екрану. Приймальна штиркова антена проходить крізь два отвори, розташовані на осі циліндричного екрану.

Приймання радіосигналу в аксійнім напрямку висильної антени підтверджує наші висновки: в аксійнім напрямку провідника антени випромінюють дві складові магнетного поля, які зрівноважують одна одну, діючи протифазно. Мідний циліндр екранує складову магнетного поля, поширювану ортогонально до вісі антени – потенціяльну складову, антена приймає лише соленоїдальну складову.

Використання Е-Н антен засадничо цікаве, бо демонструє можливість виділення й використання соленоїдальної складової магнетного поля в аксійнім напрямку провідника. *Може, невдовзі інші аналогічні досліди дадуть нові знання про можливість використання соленоїдального магнетного поля.*

7. ОБЕРТОВІ МОМЕНТИ В МАГНЕТНИХ СИЛОВИХ ВЗАЄМОДІЯХ

Соленоїдальні складові магнетних сил – дії й протидії – не розташовані на одній прямій. Це свідчення того, що магнетна взаємодія елементів провідників містить обертові моменти:

$$\overline{M}_{12} = \left[\overline{r}_{12} (\overline{F}_{12s} - \overline{F}_{21s}) \right]; \quad \overline{M}_{21} = \left[\overline{r}_{21} (\overline{F}_{21s} - \overline{F}_{12s}) \right]; \quad \overline{M}_{12} = \overline{M}_{21}.$$

Дивно, що обертові моменти мають однаковий напрямок, чи відповідає це дійсності? Р. Г. Сігалов [7, с. 126] описав виконаний ним експеримент Фарадея з обертанням магнета, що плаває в електроліті навколо закріпленого провідника (рис. 7). Сігалов зробив і інший експеримент: обертання провідника навколо закріпленого магнета. Досліди демонструють, що за однакового напрямку струму магнет навколо провідника й провідник навколо магнета обертаються в однім напрямку. Досліди Фарадея згадує й Г.В.Ніколаєв («Непротиворечивая электродинамика»), [11, стор. 43]. Досліди Ніколаєва підтверджують: обертання магнета й обертання провідника відбуваються в однім напрямку (рис.8). Досліди Сігалова й Ніколаєва свідчать, що обертові моменти в магнетних силових взаємодіях дійсно мають однаковий напрямок. Тобто, взаємодія провідника й магнета не є звичайна механічна взаємодія – передача обертального руху між двома об'єктами. Соленоїдальна складова магнетного поля створює вихор, що обертає в однім напрямку обидва об'єкти взаємодії. Магнетне поле є реальний третій учасник такої взаємодії – *соленоїдальне магнетне поле **реально** обертається*. Модель Ерстеда вихорової природи магнетної взаємодії підтверджується.

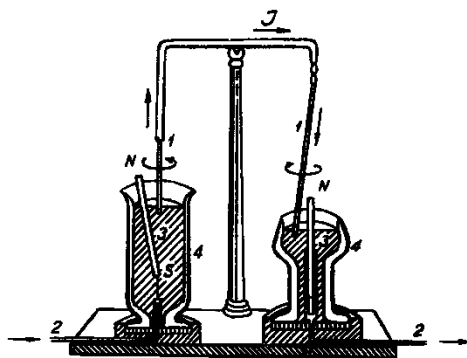


Рис.6 Експерименти Сігалова.

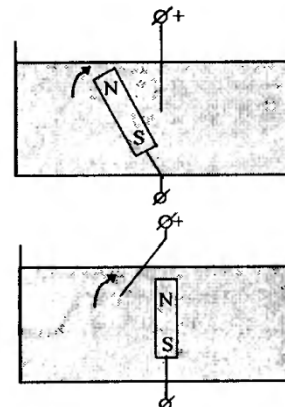


Рис.7. Експерименти Ніколаєва.

8. МАГНЕТНА СКЛАДОВА СИЛИ ЛОРЕНЦА

Магнетна складова сили Лоренца є сила дії на заряд, що рухається в магнетнім полі. Якщо індукція $\mathbf{B}$ магнетного поля створена замкненим контуром чи сумою замкнених контурів, формула Лоренца визначає її коректно:

$$\bar{\mathbf{F}} = [\bar{\mathbf{V}}\bar{\mathbf{B}}].$$

Але цю ж формулу використовують для взаємодії зарядів, що рухаються:

$$\bar{\mathbf{F}}_{12} = \frac{\mu_0 q_1 q_2}{4\pi r^3} \left[\bar{\mathbf{V}}_2 \left[\bar{\mathbf{V}}_1 \bar{\mathbf{r}}_{12} \right] \right];$$

де q_1, q_2 – заряди, що рухаються, V_1, V_2 – їхня швидкість.

Якщо магнетне поле створено рухом іншого заряду, треба врахувати силу протидії, тобто коректною в цім разі буде формула, аналогічна формулі Віттекера:

$$\bar{\mathbf{F}}_{12} = \frac{\mu_0 q_1 q_2}{4\pi r^3} \left(-\bar{\mathbf{r}}_{12} (\bar{\mathbf{V}}_1, \bar{\mathbf{V}}_2) + \bar{\mathbf{V}}_1 (\bar{\mathbf{V}}_2, \bar{\mathbf{r}}_{12}) + \bar{\mathbf{V}}_2 (\bar{\mathbf{V}}_1, \bar{\mathbf{r}}_{12}) \right).$$

(8 – 1)

Магнетне поле не змінює енергії частинки, коли магнетна сила ортогональна напрямку руху частинки. Але в магнетній взаємодії зарядів магнетна сила може мати довільний напрямок, тому енергії частинок можуть змінюватися. В разі паралельного руху частинок магнетна сила відштовхувальна – це та ж повища модель взаємодії елементів провідників. Якщо частинки рухаються антипаралельно, магнетна сила притягальна.

ВИСНОВКИ

Класична електродинаміка має за магнетне поле поле аксійного псевдовектора магнетної індукції $\mathbf{B}$. Це поле віртуальне, штучне. Реально таке поле не існує. Властивості його не є властивості реального магнетного поля, наприклад, означення, що магнетне поле соленоїдальне. Псевдовекторність виразів магнетної взаємодії спричинила помилковість виразів сил взаємодії елементів провідників, взаємодії рухомих зарядів – порушення принципу рівності сил дії-протидії.

Подавши магнетне поле реальними фізичними полярними векторами, ми довели, що реальне магнетне поле має дві складові, що існують і діють незалежно: потенціальне й соленоїдальне поля. В роботі наведено коректний вираз закону Ампера й коректне трактування закону Біо-Савара, що не заперечує можливості аксійних взаємодій і пояснює більшість «парадоксальних» дослідів в електродинаміці.

ЛІТЕРАТУРА

1. В. Петущак, Н.Козлова, Б.Осика. Закон Ампера й парадоксальні експерименти в електродинаміці. SSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2014. Випуск 4. С. 24–38
2. А.М.Ампер, Электродинамика, из-во АН СССР, 1954.
3. И.Е.Тамм И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм – М.: ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ, 1989. – 627 с.
4. Г.Хр.Эрстед. «Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку». 1820 г. Ørsted, Hans Christian: Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam, 1820

5. М.Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Том 2. Из-во АН СССР, 1951 г.
6. J.C. Maxwell. A Treatise on Electricity and Magnetism vol. 2 Dover New York
7. Р.Г.Сигалов и др. Новые исследования движущих сил магнитного поля. Ташкент, 1975.
8. Pappas P.T. The Original Ampere Force and Bio-Savart and Lorentz Forces. IL Nuovo Cimento. 11 Agosto, 1983, V.76 B, №2, P 189-196
9. Grassmann H. Neue Theorie der Elektrodynamik / H. Grassmann // Annalen der Physik und Chemie/ – 1845. – Bd. 64, №1/ – S. 1–18.
10. E.D.Whittaker. История теории эфира и электричества. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
11. Николаев Г.В. Непротиворечивая электродинамика. Теория, эксперименты, парадоксы / Г.В. Николаев – Томск : издавн. НТЛ, 1997.
12. В.Коробейников. Новый вид электромагнитного излучения. N-t.ru Наука и техника <http://n-t.ru/tp/ts/nv.htm>

Acknowledgments

We would like to thank PhD Volodymyr Kozysjky - Senior Researcher at the Institute of Theoretical Physics for encouragement and for many fruitful discussions

†

Ozmaniec for many fruitful discussions. We thank Peter Heinzner for the discussions during our stay in Bochum in August 2016. TM would like to thank the University of G

ö

ttingen for

hospitality during his stay in the summer of 2016, where this work was partially done. TM was supported by DAAD Short-Term Reserach Grant no. 57214227, Polish Ministry of Science and Higher Education

,

Diamontowy Grant

,

no. DI2013 016543 and ERC grant QOLAPS.

VVT is supported by the DFG grant Sachbeihilfe DFG-AZ: TS 352/1-1.

