

РАСПРОСТРАНЕНІЕ

ПЕРЕМѢННЫХЪ (ТЕЛЕФОННЫХЪ) ТОКОВЪ

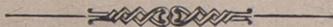
ВЪ ЛИНЕЙНЫХЪ ПРОВОДНИКАХЪ

ВЪ СВЯЗИ СЪ УСЛОВІЯМИ ТЕЛЕФОНІРОВАНІЯ НА
ДАЛЕКОЕ РАЗСТОЯНІЕ.



СОСТАВИЛЪ

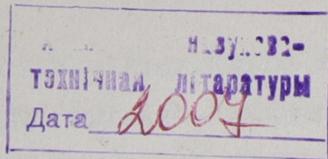
Инженеръ Г. Мерчингъ.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

ТИПОГРАФІЯ МИНИСТЕРСТВА ВНУТРЕННИХЪ ДѢЛЪ.

1890.



Распространение переменных (телефонных) токовъ въ линейныхъ проводникахъ въ связи съ условіями телефонирования на далекое разстояніе.

Составилъ инженеръ Г. Мерчингъ.

Будущее развитіе электротехники тѣсно связано съ вопросомъ о примѣненіи переменныхъ токовъ. Въ настоящее время можно уже съ большою вѣроятностью предполагать, что трудная задача снабдить изъ одной центральной станціи большой городъ электрическою энергіею въ видѣ свѣта или механической работы можетъ быть рѣшена вполне цѣлесообразно и дешево только помощью переменнаго тока. Примѣненіе постоянныхъ токовъ будетъ, по всей вѣроятности, ограничено частными установками въ маломъ размѣрѣ или же такими примѣненіями, въ которыхъ постоянные токи незамѣнимы по самому своему физическому характеру—напр., при электролизѣ. Съ другой стороны, какъ извѣстно, къ разряду переменныхъ токовъ принадлежатъ тоже и телефонные токи, причемъ даже ихъ физическій характеръ въ отношеніи числа переменныхъ направленія тока въ секунду не особенно различается отъ характера токовъ, доставляемыхъ машинами ¹⁾. Въ телефонѣ токъ, по Wietlisbach'у мѣняетъ свое направленіе 50—5.000 разъ въ секунду, смотря по звукамъ человѣческаго голоса. Въ новѣйшихъ машинахъ переменнаго тока переменныя направленія происходятъ отъ 80 до 300 разъ въ секунду, числа значитъ получаютъ приблизительно одного порядка, и физическій характеръ машинныхъ и телефонныхъ токовъ почти одинаковъ.

Не смотря однако-жъ на указанное значеніе переменныхъ токовъ, законы ихъ распространенія въ проводахъ мало извѣстны болѣе обширному кругу техниковъ. Причину слѣдуетъ искать въ томъ, что эти законы даются вообще въ формѣ довольно сложныхъ и очень трудныхъ въ интегрированію дифференціальныхъ уравненій, такъ что для ихъ изученія требуются уже обширныя свѣдѣнія по труднѣйшимъ частямъ высшей математики. Въ виду однако-жъ значенія вопроса, постараемся въ по-

¹⁾ Очевидно однако-жъ телефонные токи несравненно слабѣ машинныхъ по своему напряженію (амперамъ).

слѣдующемъ изложить въ сжатой формѣ хоть ту часть предмета, которая относится къ телефонамъ и главнымъ образомъ къ важной и трудной задачѣ—телефонированія на далекое разстояніе.

1. Законъ Ома, доставляющій намъ въ простой формѣ связь между электровозбудительною силою цѣпи, ея сопротивленіемъ и напряженіемъ ¹⁾ тока:

$$E = RJ \dots 1)$$

представляетъ на самомъ дѣлѣ только *приближенное* выраженіе для тѣхъ процессовъ, которые происходятъ въ электрической цѣпи. На самомъ дѣлѣ связь эта гораздо сложнѣе. Каждая электрическая цѣпь обладаетъ кромѣ сопротивленія еще двумя другими, такъ сказать, электрическими свойствами: *самоиндукціею* и *емкостью*, которыя вліяютъ на измѣненіе основнаго закона Ома. Емкость зависитъ отъ того, что каждая цѣпь есть какъ бы одна обкладка Лейденской банки, изоляторъ которой воздухъ, а другая обкладка земля; самоиндукція же обусловливается геометрическою формою и размѣрами проводника, а также магнитными свойствами его самого и окружающей среды. Если въ цѣпи замыкается токъ при извѣстной разности потенціаловъ E , то эта разность расходуется не только на потерю потенціала въ цѣпи RJ , но также на зарядъ цѣпи и преодоленіе противодѣйствующей электровозбудительной силы самоиндукціи. Если коэффициентъ самоиндукціи цѣпи L *кадрановъ* (измѣреніе его 10^9 см.), то это значить, что при нарастаніи тока въ продолженіе одной секунды отъ нуля до одного ампера въ цѣпи наводится противодѣйствующая главной электровозбудительная сила въ L вольтъ. Вообще значить противодѣйствующая сила самоиндукціи $e = L \frac{dJ}{dt}$ ²⁾ и ее надо ввести съ отрицательнымъ знакомъ въ уравненіе Ома, которое получить такимъ образомъ видъ дифференціального уравненія I-го порядка.

$$RJ + L \frac{dJ}{dt} - E = 0 \dots 2).$$

¹⁾ Мы употребляемъ терминъ «напряженіе» вмѣсто обыкновенно употребляемаго «сила тока» т. к. терминъ «напряженіе» кажется болѣе соотвѣтствуетъ характеру явленія электрическаго тока, и притомъ терминъ «сила» можетъ быть смѣшиваемъ съ «электровозбудительною силою». Слово напряженіе принято во всѣхъ языкахъ.

²⁾ Въ точности электровозбудительная сила самоиндукціи $e = \frac{d}{dt} (LJ) = L \frac{dJ}{dt} + J \frac{dL}{dt}$ L вообще отъ времени не зависитъ и потому $e = L \frac{dJ}{dt}$. Но если матеріалъ, изъ котораго сдѣлана цѣпь, *подлежитъ намагничиванію* (напр.: желѣзо), то $L = f(t)$, и уравненіе $\dots 2$ надо пополнить еще однимъ дифференціальнымъ членомъ.

Въ уравненіе 2) наконецъ надо бы еще ввести членъ, выражающій зарядъ цѣпи; но какъ вліяніе емкости сравнительно съ самоиндукціею незначительно, то для перваго приближенія можно пренебречь соотвѣтственными членами, которые излишне усложняютъ дифференціальное уравненіе.

Интегрированіе ур. 2) не представляетъ затрудненій, если коэффициенты R , E и L величины *постоянныя*, т. е. если у насъ сопротивление цѣпи и ея электровозбудительная сила постоянны. Интеграль будетъ:

$$J = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) \dots 3)$$

причемъ e основаніе Неперовыхъ логарифмовъ.

Формула . . . 3) только для безконечно-большого времени ($t = \infty$), т. е. спустя безконечное время послѣ замыканія цѣпи переходитъ въ формулу Ома $J = \frac{E}{R}$. Во все остальное время напряженіе *меньше*, чѣмъ по закону Ома. Не трудно однако-жъ убѣдиться, что токъ весьма быстро *на*ростаетъ послѣ замыканія цѣпи (для $t = 0$, $e^{-\frac{Rt}{L}} = 1$, $J = 0$) и разность между предѣльнымъ значеніемъ тока $J = \frac{E}{R}$ и дѣйствительнымъ по формулѣ . . . 3) дѣлается очень скоро весьма малою величиною. Расчетъ напр.: спустя какое время послѣ замыканія тока токъ получитъ $\frac{1}{2}$ и $\frac{9}{10}$ полного своего напряженія.

Для перваго случая $e^{-\frac{Rt}{L}} = \frac{1}{2}$ и $\frac{Rt}{L} = -\log_e \left(\frac{1}{2} \right)$;
 $t_1 = -\frac{L}{R} \log_e \left(\frac{1}{2} \right) = -\frac{L}{R} (0.43 - 0.87) = 0.44 \frac{L}{R} \dots a).$

Для втораго случая $t_2 = -\frac{L}{R} \log_e \left(\frac{1}{10} \right) = -\frac{L}{R} (0.43 - 4.34) = 3.9 \frac{L}{R} \dots b).$

Такъ какъ $\frac{L}{R}$ почти всегда значительно меньше единицы, то токъ очень быстро приближается къ предѣльному значенію. Такъ напр. для обыкновенной катушки Морзе $L =$ ок. 6 кадранамъ, $R = 500$ омовъ, $\frac{L}{R} = \approx 0.01$, токъ значить послѣ $\frac{1}{200}$ секунды достигаетъ половиннаго напряженія, а послѣ $\frac{1}{25}$ секунды 0.9 полного напряженія. Во всякомъ случаѣ однако-жъ *быстрота* нарастанія тока, какъ видно изъ формулъ... а)

и . . . в), при постоянномъ R обратно пропорциональна коэффициенту самоиндукции L . Этотъ выводъ имѣетъ громадное значеніе въ теоріи телефонированія на далекое разстояніе.

Опыты показали, что телефонъ передаетъ звуки тѣмъ лучше, чѣмъ *быстрѣ* нарастаніе возбуждающаго телефонъ тока. Если въ системѣ координатъ принять за ось абсциссъ время, за ось ординатъ напряженіе тока, то чѣмъ *положе* кривая, выражающая зависимость напряженія отъ времени, тѣмъ хуже слышно въ телефонъ. При извѣстной, характерной для каждой данной системы телефоновъ пологости кривой, телефонъ перестаетъ вовсе звучать. Очевидно, слѣдовательно, что увеличеніе самоиндукции линіи непосредственно ухудшаетъ передачу и при извѣстной величинѣ коэффициента самоиндукции можетъ ее вовсе прекратить. Этимъ свойствомъ воспользовался Van Rysselberghe въ своей системѣ въ такъ называемыхъ градуаторахъ.

Коэффициентъ самоиндукции телефонной линіи вообще состоитъ изъ двухъ частей—изъ самоиндукции самой линіи и самоиндукции приборовъ, т. е. катушекъ, включенныхъ въ линію. Коэффициентъ самоиндукции катушекъ вообще величина *очень большая* въ сравненіи съ самоиндукціею линейнаго провода такой же длины и діаметра какъ проволока, смотанная въ катушку. Приблизительно (хотя съ значительною погрѣшностью) можно принять, что коэффициентъ самоиндукции катушки ¹⁾ въ n оборотовъ, съ поперечнымъ сѣченіемъ S квадратныхъ сантиметровъ, съ желѣзнымъ стержнемъ внутри оборотовъ будетъ:

$$L_k = \frac{4\pi n^2 S \mu}{l} \dots \dots 3),$$

причемъ μ такъ называемый коэффициентъ магнитной проницаемости внутренняго сердечника. Если сердечникъ желѣзный, то $\mu = \text{ок. } 340$, если онъ деревянный $\mu = 1$. l длина катушки.

Изъ предъидущаго можно заключить, что катушка съ желѣзнымъ сердечникомъ, включенная въ цѣпь, по которой проходитъ телефонный токъ, вообще говоря, играетъ роль пробки, заглушающей телефонные токи. Поэтому, безъ особыхъ приспособленій трудно, напр., телефонировать по линіи, въ разрѣзъ которой включено нѣсколько телеграфныхъ аппаратовъ.

¹⁾ При этомъ L по формулѣ . . . 3) получается въ CGS системѣ. Желая получить L въ гадранахъ, надо полученное число раздѣлять на 10^9 .

Самоиндукція самої лінії играєть очевидно таже роль при телефонній передачі. *Maxwell* далъ формулу для коеффіціента самоіндукціи лінейныхъ проводовъ въ функціи ихъ діаметра $d = 2r$ и длины l . Если l выражено въ четвертяхъ земнаго меридіана ($= 10^9$ см.), то L въ кадрахъ выражается ¹⁾:

$$L = 2l \left(\log_e \frac{2l}{r} - 0.75 + \pi k \right) \dots 4)$$

причемъ k коеффіціентъ намагничиваемости *матеріала*, изъ котораго сдѣланъ проводъ. Коеффіціентъ этотъ для желѣза отъ 30—40, для не намагничивающихся матеріаловъ—нуль, причемъ онъ связанъ съ μ уравненіемъ $\mu = 1 + 4\pi k$, и въ свою очередь зависитъ отъ напряженія тока.

Разсчитаемъ для примѣра по формулѣ . . . 4) коеффіціентъ самоиндукціи телеграфной лінії Петербургъ—Москва въ предположеніи: а) что она какъ въ дѣйствительности желѣзная, б) что она мѣдная,

а) $l = 606$ верстъ ≈ 670 km. $= 0.067$ четверти меридіана; $r = 5$ mm.

$$\frac{2l}{r} = \approx 54 \cdot 10^7.$$

$\log_e (54 \cdot 10^7) = 2.3 \times 8.73 = \approx 19.28$; $\pi k = \approx 100$; $L_{жс} \approx 2 \times 0.067 \times \times (20 + 100) = 16$ кадровъ.

б) $L_m = \approx 2 \times 0.067 (19.28 - 0.75) = \approx 2.5$ кадрана.

Этотъ примѣръ показываетъ, какое громадное вліяніе на телефонію на далекое разстояніе имѣетъ замѣна желѣза мѣдью. Оно равносильно въ данномъ случаѣ увеличенію самоиндукціи лінії въ слишкомъ шесть разъ.

Мы до сихъ поръ допускали, что коеффіціенты въ дифференціальномъ уравненіи . . . 2) постоянные. На самомъ дѣлѣ однако-жъ, картина явленія при телефонной передачѣ значительно сложнѣе. Мы теперь обратимся къ болѣе полному разсмотрѣнію вопроса.

2. Болѣе всего употребительная схема телефонной передачи, какъ

¹⁾ Формула . . . 4) получена изъ выраженія для коеффіціента взаимной индукціи двухъ прямолинейныхъ параллельныхъ проводовъ $M = 2l \left(\log \frac{2l}{h} - 1 \right)$, гдѣ h разстояніе между проводами. Токъ, проходящій по линейному проводу, можно разсматривать какъ совокупность элементарныхъ токовъ параллельныхъ другъ другу. Эти токи дѣйствуютъ другъ на друга по приведенной формулѣ, въ которую только вмѣсто разстоянія двухъ токовъ h , надо ввести среднее разстояніе элементарныхъ токовъ, проходящихъ по цилиндру радіусомъ r . Это $h = 0.7788r$. Подставляя получимъ $L = M = 2l \left(\log_e \frac{2l}{0.7788r} - 1 \right) = 2l \left(\log_e \frac{2l}{r} - 0.75 \right)$. Членъ πk выражаетъ намагничиваніе.

извѣстно, состоитъ изъ двухъ электрическихъ цѣпей. Одна изъ нихъ, *микрофонная*, первичная включаетъ въ себя *микрофонъ-передатчикъ*, въ который говорятъ, батарею изъ нѣсколькихъ элементовъ и, наконецъ, трансформационную катушку, при помощи которой колебанія тока въ первичной цѣпи передаются вторичной. Вторичная цѣпь, въ свою очередь, кромѣ вторичной обмотки трансформационной катушки и линейнаго провода, заключаетъ въ себѣ *телефонъ-приемникъ*, въ который слушаютъ. Все явленіе телефонной передачи съ физической точки зрѣнія происходитъ такимъ образомъ, что звуковыя волны человѣческаго голоса дѣйствуютъ на микрофонный контактъ и измѣняютъ его сопротивленіе въ униссонъ съ звуковыми колебаніями воздуха. Вслѣдствіе этого токъ въ первичной микрофонной цѣпи, *сохраняя постоянное направленіе*, измѣняетъ свое напряженіе по тому же закону, какъ и звуковыя колебанія. Извѣстно изъ акустики, что звуковыя колебанія есть колебанія *гармоническія*, т. е., что разстояніе частицы отъ положенія равновѣсія во время t , считая отъ начала колебаній, при періодѣ колебаній T будетъ

$$a = A \sin 2\pi \frac{t}{T} \dots c_1,$$

причемъ A амплитуда колебаній.

Предполагая, что сопротивленіе микрофоннаго контакта измѣняется по тому же гармоническому закону, получимъ:

$$w = w_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} + w_1,$$

гдѣ w полное сопротивленіе первичной цѣпи, w_0 —амплитуда колебаній сопротивленія въ микрофонѣ, w_1 —сопротивленіе цѣпи, кромѣ микрофона. Такъ какъ въ микрофонахъ обыкновенно измѣненія сопротивленія контакта во время работы составляютъ около $\frac{1}{5}$ части всего сопротивленія первичной цѣпи (напр., при 5 омахъ сопротивленія первичной цѣпи, вариации сопротивленія контакта составляютъ около 1 ома, т. е. во время разговора сопротивленіе цѣпи варьируетъ отъ $4\frac{1}{2}$ — $5\frac{1}{2}$ омовъ), то въ такомъ же отношеніи находится и w_0 къ w .

Синусоидальная гармоническая волна тока первичной цѣпи, проходя черезъ трансформационную катушку, вызываетъ во вторичной, телефонной цѣпи, подобную же синусоидальную волну, которая, передаваясь по линейному проводу, поступаетъ въ телефонъ и возбуждаетъ его къ передачѣ

звукѡвъ. Различіе тока вторичной цѣпи отъ первичной состоитъ только въ томъ, что это токъ очевидно *переменный*, такъ какъ каждому нарастанію и каждому убыванію тока первичной цѣпи соотвѣтствуетъ переменна направленія тока вторичной цѣпи. Очевидно также, что число переменъ въ единицу времени равно числу колебаній въ звукѣ, возбуждающемъ микрофонный контактъ первичной цѣпи. Для обыкновенныхъ звуковъ человѣческаго голоса число это варьируетъ, какъ уже было сказано отъ 50—5,000. Если бы вторичная цѣпь ограничивалась только трансформационною катушкою и телефономъ, или же, если бы по крайней мѣрѣ, какъ это бываетъ въ случаѣ городскихъ телефоновъ, линейный проводъ былъ короткій, то качества передачи зависѣли бы почти исключительно отъ свойствъ употребляемыхъ въ дѣло микрофоновъ и телефоновъ. Но въ случаѣ сколько нибудь длиннаго линейнаго провода, картина явленія значительно усложняется.

Условіе хорошей передачи должно, очевидно, состоять въ томъ, чтобы электрическая волна, возбуждающая телефонъ, была тождественна съ волною, возбуждаемою микрофономъ или же, чтобы по крайней мѣрѣ *всѣ* электрическія волны телефонной цѣпи протерпѣвали тождественныя измѣненія. Не трудно, однако-жъ, даже безъ математическихъ выкладокъ представить себѣ, что эта тождественность нарушается самоиндукціонными свойствами линій. Дѣйствительно, каждое волнообразное движеніе характеризуется двумя факторами: амплитудою колебаній и фазою. Оба эти фактора измѣняются въ связи съ самоиндукціей и притомъ *различнымъ* образомъ для *различнаго* числа колебаній, такъ что вліяніе самоиндукціи *иначе* видоизмѣняетъ волны съ разнымъ часломъ колебаній. Мы уже прежде видѣли, что чѣмъ *больше* самоиндукція, тѣмъ *позже* токъ, послѣ его замыканія, достигаетъ своей нормальной величины. Очевидно, значить, что чѣмъ меньше періодъ тока (чѣмъ больше количество колебаній въ секунду), тѣмъ меньше та амплитуда, которой онъ, при данной самоиндукціи, можетъ достигнуть въ періодъ своего замыканія, до того момента, когда дальнѣйшее нарастаніе тока прерывается и направленіе его переменяется. Кромѣ амплитуды самоиндукція обнаруживаетъ также вліяніе на фазу волны. Вліяніе это отражается такимъ образомъ, что волна вторичной цѣпи *запаздываетъ* относительно первичной, и притомъ опять это запаздываніе *зависитъ отъ числа колебаній въ секунду* и значить разное для разныхъ тоновъ и звуковъ человѣческаго голоса. Поэтому, если влія-

ніе самоіндукції ліній довольно сильно, то въ телефонъ поступають совершенно другія электрическія волны, чѣмъ тѣ, которыя возбуждены въ микрoфонѣ, и потому телефонъ воспроизводитъ вмѣсто понятнаго разговора только шумъ. Это и замѣчается тогда, когда коэффициентъ самоіндукції ліній большой, что въ силу формулы . . . 4) тѣсно связано съ разстояніемъ передачи.

Постараемся выразить всѣ эти условія математически 1).

Если обозначимъ:

1) Для первичной, *микрoфонной* цѣпи, напряженіе тока черезъ j , сопротивление цѣпи черезъ w , электровозбудительную силу дѣйствующей батареи E , коэффициентъ самоіндукції цѣпи p .

2) Для вторичной, *телефонной* цѣпи—напряженіе тока J , сопротивление W , коэффициентъ самоіндукції P .

3) Коэффициентъ взаимной индукції обѣихъ цѣпей другъ на друга, т. е. ту электровозбудительную силу въ вольтахъ, которая наводится въ одной изъ цѣпей, когда напряженіе тока въ другой въ продолженіе одной секунды возрастаетъ отъ нуля до одного ампера—черезъ M ,—тогда напряженія токовъ j и J должны удовлетворять слѣдующей системѣ совокупныхъ дифференціальныхъ уравненій съ переменными коэффициентами

$$\left. \begin{aligned} (jw - E) + p \frac{dj}{dt} + M \frac{dJ}{dt} &= 0 \\ JW + P \frac{dJ}{dt} + M \frac{dj}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots 5)$$

Интегрированіе системы дифференціальныхъ уравненій . . . 1) довольно затруднительно. Мы приводимъ здѣсь непосредственно интеграль $J=f(t)$, въ томъ приближенномъ видѣ, въ какомъ онъ данъ Wietlisbach'омъ loc cit.).

Интеграль $J=f(t)$ будетъ:

$$J = \frac{J_0 \cdot r}{N} \cdot M \cdot \cos(2 \pi n t + \rho), \dots 6)$$

причемъ

$J_0 = \frac{E}{w}$; r есть амплитуда колебаній сопротивления микрoфоннаго контакта;

1) Всѣ послѣдующія математическія выкладки по Wietlisbach'у «Die Theorie des Mikrotelephons». Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie 1882, томъ XVI, стр. 594.

n число колебаній въ единицу времени;

$$N^2 = \left[2 \pi n (M^2 - Pp) + \frac{Ww}{2\pi n} \right]^2 + (wP + Wp)^2 \dots d)$$

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{2\pi n (M^2 - Pp) + \frac{Ww}{2\pi n}}{wP + Wp} \dots e)$$

Формула ... 6) непосредственно показываетъ зависимость амплитуды и фазы наведенной электрической волны отъ самоиндукціи линейнаго

провода P , и отъ числа колебаній n . Амплитуда $\frac{J_0 r M}{N}$ зависитъ отъ N , которое въ свою очередь есть функція P и n ; запаздываніе же фазы выражается угломъ ρ , который также зависитъ отъ P и n .

Такъ какъ въ предыдущихъ формулахъ ... d) и ... e) членъ $\frac{Ww}{2\pi n}$ величина вообще незначительная въ сравненіи съ $2\pi n (M^2 - Pp)$ (n величина большая), то имъ можно пренебречь и написать формулы ... d) ... и ... e) въ болѣе сокращенномъ видѣ.

$$N^2 = [2\pi n (M^2 - Pp)]^2 + (wP + Wp)^2 \dots d')$$

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{2 \pi n (M^2 - Pp)}{Wp + wP} \dots e')$$

Вліяніе числа колебаній n на амплитуду и фазу тѣмъ слабѣе, а значитъ *телефонная передача тѣмъ лучше*, чѣмъ меньше выраженіе $M^2 - Pp$ по абсолютной величинѣ. Но изъ трехъ величинъ M , P , p , только P имѣетъ значительную величину, которая, какъ мы видѣли, возрастаетъ съ увеличеніемъ длины линіи; сообразно съ этимъ, передача ухудшается съ удлиненіемъ линіи. Опыты показали, что разстояніе 300—400 верстъ слѣдуетъ считать предѣломъ телефонной передачи по желѣзному проводу безъ особыхъ приспособленій, о которыхъ скажемъ ниже; это обстоятельство позволяетъ заключить въ силу формулы ... 4), что приблизительно 8 кадрановъ самоиндукціи линіи составляютъ предѣлъ телефонной передачи въ обыкновенныхъ условіяхъ. Въ случаѣ *мѣднаго* провода линія въ 8 кадрановъ самоиндукціи имѣла бы приблизительно 1.600 верстъ длины, при диаметрѣ въ 5 mm., что и подтверждается извѣстными опытами телефонирования между Нью-Йоркомъ и Чикаго, причемъ разстояніе было 1.650 километровъ и передача была еще удовлетворительна.

Общій выводъ, который можно сдѣлать изъ всѣхъ предыдущихъ формулъ, тотъ, что одно изъ главныхъ условій при улучшеніи телефонной

передачи на далекое разстояніе—замѣна намагничивающагося матеріала проводовъ—железа, ненамагничивающимся—*мѣдью*. Такъ, напр.: во Франціи всѣ линіи телефонированія на далекое разстояніе, между прочимъ Парижъ—Марсель (860 километровъ)—мѣдныя (изъ кремневой бронзы).

Спрашивается, нельзя ли какимъ нибудь искусственнымъ приспособленіемъ дѣйствовать противъ вреднаго вліянія самоиндукціи? Вопросъ этотъ имѣетъ не только важное теоретическое, но и экономическое значеніе, такъ какъ извѣстно, что мѣдь значительно дороже железа. Математическое изслѣдованіе законовъ распространенія переменныхъ токовъ въ линейныхъ проводахъ даетъ на этотъ вопросъ вообще утвердительный отвѣтъ: такого рода средствомъ могутъ служить *конденсаторы*, включенные въ линію. Дѣйствительно, конденсаторъ, включенный въ линію *уменьшаетъ* амплитуду колебанія электрической волны и *опережаетъ* ея фазу, т. е. дѣйствуетъ какъ разъ противоположнымъ образомъ, чѣмъ самоиндукція. При соответственномъ подборѣ емкости, можно бы, казалось, совершенно уничтожить вредное вліяніе самоиндукціи ¹⁾. На этомъ свойствѣ конденсаторовъ основанъ отчасти успѣхъ системы Van Rysselberghe, причемъ однако-жъ самъ изобрѣтатель вовсе не считаетъ свои конденсаторы *основною* частью своего изобрѣтенія. Наконецъ, въ послѣднее время конденсаторы нашли также примѣненіе въ системѣ русскаго изобрѣтателя г-на Гвоздѣва.

Употребленіе конденсаторовъ однако-жъ, хотя оно при соответственномъ подборѣ емкостей, можетъ значительно улучшить передачу, не въ состояніи *совершенно* уничтожить вредное вліяніе самоиндукціи. Дѣло въ томъ, что коэффициентъ самоиндукціи, завися отъ намагничиванія, зависитъ также отъ напряженія тока, между тѣмъ какъ противодѣйствующая ему емкость включенныхъ конденсаторовъ отъ напряженія не зависитъ и потому *полной* компенсаціи въ случаѣ железнаго провода, когда она важнѣе всего, нельзя получить никогда.

Мы должны здѣсь обратить вниманіе еще на одно обстоятельство. При выводѣ всѣхъ предъидущихъ формулъ предполагалось, что можно пренебречь емкостью самой линіи, что на самомъ дѣлѣ для длинныхъ линій не вполне вѣрно. Вслѣдствіе этого всѣ предъидущія формулы пред-

¹⁾ Мы не приводимъ здѣсь очень сложнаго математическаго вывода этого свойства конденсаторовъ. Читатели найдутъ его между прочимъ въ хоршемъ *resumé* у Picou: «*Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques*», Paris, 1890.

ставляютъ только болѣе или менѣе близкое къ дѣйствительности изображеніе физической картины процессовъ, происходящихъ при телефонированіи на далекое разстояніе. На самомъ дѣлѣ картина эта гораздо сложнѣе такъ какъ мы имѣемъ здѣсь дѣло съ колебательными разрядами, т. е. такими, въ которыхъ напряженіе (сила) тока въ цѣпи зависитъ не только отъ времени, но и отъ мѣста въ цѣпи. Дифференціальныя уравненія, представляющія это состояніе, есть уравненія съ частными производными высшихъ порядковъ, которыхъ интегрированіе въ общемъ случаѣ, уже съ чисто математической точки зрѣнія, представляетъ значительныя затрудненія. Очевидно, что точное рѣшеніе рассматриваемыхъ вопросовъ является крайне сложнымъ, на сколько оно вообще возможно теоретическимъ путемъ ¹⁾.



¹⁾ Одинъ изъ интересныхъ выводовъ, которые можно сдѣлать на основаніи теоріи колебательныхъ разрядовъ, указываетъ на то, что вѣроятно, при той же затратѣ матеріала, телефонная передача была бы лучше по лентообразнымъ, нежели по цилиндрическимъ проводникамъ. Интересно было бы провѣрить наше заключеніе на практикѣ.