

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Журналъ, издаваемый VI Отдѣломъ

Императорскаго Русскаго Техническаго Общества.

Расчетъ и цѣлесообразное распредѣленіе проводовъ воздушныхъ параллельныхъ линий переменнаго тока.

Статья инженера Г. П. Марковича.

Предисловіе.

Сопротивленіе R , коэффициентъ самоиндукціи L , проводимость λ и емкость C носятъ названіе электрическихъ постоянныхъ воздушныхъ линий переменнаго тока. Вычисленіе этихъ электрическихъ постоянныхъ не представляетъ изъ себя никакихъ затрудненій, пока воздушныя линии переменнаго тока состоятъ изъ одного провода на фазу, и можетъ быть найдено въ большинствѣ учебниковъ по электротехникѣ. Но когда линии переменнаго тока состоятъ изъ нѣсколькихъ параллельно соединенныхъ проводовъ на фазу, тогда вычисленіе электрическихъ постоянныхъ становится затруднительнымъ, въ особенности вычисленіе коэффициента самоиндукціи и емкости. Относительно этого случая учебники по электротехникѣ не содержатъ почти никакого матеріала. И мы принуждены прибѣгать къ электротехнической литературѣ, разбросанной по разнымъ журналамъ, чтобы набрать матеріалъ, который служилъ бы основаніемъ для расчетовъ индукціи и емкости сложныхъ воздушныхъ линий передачи энергіи на разстоянія. Но не легко разобраться въ электрической литературѣ, такъ какъ разные авторы исходятъ изъ разныхъ основаній положеній и рекомендуютъ то одинъ, то другой методъ, какъ мы увидимъ въ послѣдствіи, и разумѣется, что благодаря этому читатель сбивается съ своего пути и начинаетъ сомнѣваться въ своихъ заключеніяхъ.

По этому, цѣль настоящаго труда состоитъ именно въ томъ, чтобы изложить всѣ до сихъ поръ опубликованные методы вычисленія коэффициента индукціи и емкости воздушныхъ линий переменнаго тока и указать на преимущества и недостатки этихъ методовъ. Далѣе привести серію новыхъ діаграммъ, принадлежащихъ автору и дающихъ возможность простѣйшаго графическаго вычисленія коэффициента индукціи и ем-

кости самыхъ сложныхъ воздушныхъ линий переменнаго тока, содержащихъ нѣсколько параллельно соединенныхъ проводовъ на фазу; затѣмъ указать, какъ нужно распредѣлять провода воздушныхъ линий для того, чтобы получить наименьшую потерю напряженія и силы тока вдоль проводовъ.

И въ самомъ дѣлѣ провода, передающіе переменныя токи, оказываютъ магнитныя и электрическія дѣйствія другъ на друга и на основаніи этихъ явленій емкость этихъ проводовъ можетъ быть разсматриваема аналогично ихъ самоиндукціи, слѣдовательно и графически быть вычислена какъ и самоиндукція проводовъ.

Въ послѣдующемъ мы будемъ разсматривать только однофазную и трехфазную системы, какъ единственныя, примѣняемыя въ настоящее время для передачи электрической энергіи на разстоянія. Мы будемъ разсматривать эти системы, когда онѣ содержатъ одинъ проводъ и когда онѣ содержатъ нѣсколько параллельно соединенныхъ проводовъ на фазу.

Въ параграфѣ объ индукціи воздушныхъ линий переменнаго тока мы приводимъ серію новыхъ діаграммъ съ примѣрами для того, чтобы лучше разъяснить магнитное дѣйствіе, оказываемое однимъ проводомъ, и магнитное дѣйствіе остальныхъ проводовъ на разсматриваемый проводъ. Комбинируя магнитное дѣйствіе развиваемое однимъ проводомъ самимъ на себя съ дѣйствіемъ на него остальныхъ проводовъ, мы опредѣляемъ при помощи векторной диаграммы графическимъ способомъ индукцію разсматриваемаго провода, а потомъ и индукцію разныхъ воздушныхъ линий переменнаго тока.

Точно также и въ параграфѣ о емкости воздушныхъ линий переменнаго тока мы опредѣляемъ прежде всего электрическое дѣйствіе, развиваемое однимъ проводомъ, а потомъ дѣйствіе, производимое остальными проводами на этотъ проводъ. Комбинируя эти два дѣйствія, мы опредѣляемъ при помощи векторной диаграммы графическимъ способомъ емкость одного провода, а потомъ и емкость на фазу самыхъ сложныхъ воздушныхъ линий переменнаго тока.

Такой способъ опредѣленія индукціи и емкости даетъ полное удовлетвореніе въ физическомъ отношеніи, какъ относительно магнитнаго,

такъ и электрическаго вліянія проводовъ другъ на друга.

Въ послѣдующемъ изложеніи мгновенныя величины обозначаются маленькими буквами (i , e , v , q) максимальныя значенія соотвѣтствующихъ величинъ прописными буквами (I , E , V , Q), а дѣйствующія или среднеквадратическія величины прописными буквами курсивнаго шрифта (I , E , V , Q).

О воздушныхъ линияхъ передачи энергии вообще.

Воздушныя линии переменнаго тока служатъ для передачи электрической энергии на болѣе или менѣе далекія разстоянія подъ болѣе или менѣе высокими напряженіемъ, достигающимъ въ особенныхъ случаяхъ и 60000 вольтъ.

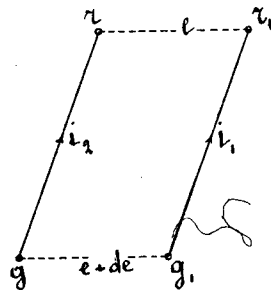
Какъ только количество передаваемой электрической энергии становится значительнымъ, является необходимость раздѣлить, по ниже указаннымъ причинамъ, вычисленное сѣченіе на фазу на нѣсколько проводовъ и въ такомъ случаѣ обыкновенно говорится, что одно число проводовъ служить для передаваемыхъ токовъ, а другое число для обратныхъ токовъ. Хотя этимъ объясненіемъ характеризуется до нѣкоторой степени передача электрической энергии, но все-таки нужно замѣтить, что такое объясненіе передачи не вполне точно въ физическомъ смыслѣ.

Согласно современнымъ взглядамъ на распространеніе электрической энергии, мы знаемъ, что эта передача совершается въ средѣ, окружающей провода. Самые же провода служатъ только для направленія явленія распространенія; электрическая энергія скользитъ такъ сказать вдоль проводовъ и значеніе провода, какъ проводника электричества, нужно понимать только въ этомъ смыслѣ. Провода исполняютъ это назначеніе, поглощая въ видѣ теплоты часть передаваемой энергии, которая уже дальше не передается.

Опыты Герца (Hertz) подтверждаютъ существованіе этой среды, черезъ которую передается электрическая энергія и въ которой проявляются магнитныя и электрическія силы.

Изслѣдуемъ теперь явленія, сопровождающія распространеніе электрической энергии вдоль проводовъ воздушной линіи въ отношеніи напряженія и силы передаемаго тока. Разсмотримъ для этой цѣли простую воздушную линію, состоящую изъ двухъ проводовъ (фиг. 1), которая передаетъ извѣстное количество энергии какому-либо пріемникамъ. Какъ только на генераторной станціи включимъ въ цѣпь линіи переменную электродвижущую силу, то тотчасъ начнетъ течь переменный токъ по проводамъ воздушной линіи и въ каждой точкѣ проводовъ установится извѣстный потенциалъ. Вслѣдствіе электрическаго дѣйствія одного провода на другой въ окружающей средѣ, въ данномъ случаѣ въ воздухѣ, обра-

зуется электрическое поле, линіи силъ котораго соединяютъ провода и на концахъ которыхъ являются равныя, но обратныя по знаку количества электричества. Слѣдовательно, каждая



Фиг. 1.

часть проводовъ заряжается извѣстнымъ количествомъ электричества q , соотвѣтствующимъ емкостью C и разности потенциаловъ e между проводами. Притомъ въ каждый моментъ времени должно имѣть мѣсто слѣдующее уравненіе:

$$q = C \cdot e.$$

Но такъ какъ количество электричества q равняется

$$q = \int i_c \cdot dt,$$

то слѣдовательно черезъ окружающій воздухъ проявится заряжающій токъ i_c или такъ называемый токъ смѣщенія, отвѣтственный отъ главнаго тока, проходящаго по проводамъ. Этотъ токъ смѣщенія выражается уравненіемъ:

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{de}{dt}.$$

Замѣтимъ, что этотъ токъ опережаетъ въ фазѣ на четверть періода дѣйствующее напряженіе e .

Установленіе электрическаго поля въ средѣ требуетъ по закону равенства дѣйствія и противодѣйствія затраты извѣстнаго количества энергии и среда должна находиться въ деформированномъ состояніи, когда равновѣсіе установилось. Отсюда слѣдуетъ, что каждый элементъ окружающей среды подвергается извѣстной деформации, причины которой суть дѣйствующія электрическія силы, т. е. токи смѣщенія. Слѣдовательно, токи смѣщенія представляютъ собою запасъ электрической энергии въ потенциальномъ видѣ, обнаруживаемомъ натяженіемъ діэлектрика (эфира въ данномъ случаѣ). Вслѣдствіе того, что дѣйствующая электродвижущая сила, а слѣдовательно и электростатическое поле, образованное между проводами и между проводами и землей, суть периодическія функціи времени, то периодическія измѣненія электростатическаго поля производятъ потери энергии, благодаря діэлектрическому гистерезису.

Далѣе слѣдуетъ еще принять во вниманіе тотъ фактъ, что каждая воздушная линія имѣетъ

несовершенную изоляцію, такъ какъ изолирующая способность изоляторовъ не представляетъ собою безконечной величины. Слѣдовательно, новые отвѣтвленные токи, соответствующіе дѣйствующей разности потенциаловъ между проводами (и землей), будутъ проходить черезъ изоляторы и кронштейны, на которыхъ устанавливаются изоляторы. Если обозначимъ черезъ ρ сопротивление между проводами, то эти отвѣтвленные токи, совпадающія въ фазѣ съ дѣйствующимъ напряженіемъ e , могутъ быть выражены уравненіемъ

$$\frac{e}{\rho} = \lambda \cdot e$$

гдѣ λ носить названіе проводимости (conductance) воздушной линіи. Сюда слѣдуетъ еще причислить и отвѣтвленные токи вслѣдствіи утечки электричества въ воздухъ при высокомъ напряженіи, явленіе извѣстное подъ именемъ «тихаго разряда».

Но токи, проходящіе по проводамъ, образуютъ въ свою очередь электромагнитныя поля, которыя должны быть также приняты во вниманіе, такъ какъ на практикѣ не существуетъ способа, могущаго устранить или уничтожить ихъ. Линіи силъ магнитнаго поля имѣютъ видъ замкнутыхъ, вокругъ проводовъ, кривыхъ. Въ виду того, что проходящіе по проводамъ токи суть также періодическія функции времени, какъ и образующая ихъ дѣйствующая на генераторной станціи электродвижущая сила, то постоянныя измѣненія электромагнитныхъ полей, вызванныхъ проходящими по проводамъ токами, индуктируютъ въ самыхъ же проводахъ электродвижущія силы самоиндукціи, противодѣйствующія прохожденію токовъ по проводамъ. Эти электродвижущія силы самоиндукціи суть причины неравномѣрнаго распредѣленія тока по проводамъ, обнаруживающіяся въ увеличеніи омическаго сопротивления самыхъ проводовъ и извѣстныя подъ именемъ «Skin effect» (явленія Скина). Вслѣдствіе магнитнаго дѣйствія одного провода на другой, каждый проводъ индуктируетъ въ другомъ электродвижущія силы взаимной индукціи, которыя вмѣстѣ съ электродвижущими силами самоиндукціи создаютъ такъ называемое индуктивное сопротивление линіи переменнаго тока (reactance). Всѣ эти противодѣйствующія электродвижущія силы, происходящія отъ постоянныхъ измѣненій магнитныхъ полей, могутъ быть выражены простымъ уравненіемъ

$$-\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

гдѣ L обозначаетъ коэффициентъ индукціи линіи переменнаго тока на единицу длины.

Установленіе магнитныхъ полей требуетъ также затрата извѣстнаго количества электрической энергии, потому что среда противопоставляетъ намагничиванію нѣкоторую инертность, обнаруживающуюся въ созданіи противодѣйствующей

силы индукціи — $L \frac{di}{dt}$. Слѣдовательно и магнитная энергія токовъ, производящая намагничиваніе среды, представляетъ собою запасъ электрической энергии въ потенциальномъ видѣ.

Изложивъ явленія, сопровождающія прохожденіе переменныхъ токовъ по проводамъ воздушной линіи, постараемся теперь выразить вышеприведенное алгебраическими уравненіями. Рассмотримъ для этой цѣли элементъ однофазной линіи длиной dx . Включимъ въ цѣпь на концахъ этого элемента линіи два вольтметра съ сопротивленіемъ R' и R'' и предположимъ, что сила тока, проходящаго по проводамъ, съ сопротивлениями R_1 и R_2 на единицу длины, въ моментъ t равняется $i_1 = -i_2 = i$. Примемъ за положительное направленіе силы тока направленіе отъ генераторной къ приемной станціи; тогда по второму закону Кирхгоффа слѣдующее уравненіе должно имѣть мѣсто въ данный моментъ:

$$i_1 R_1 dx + i R' - i_2 R_2 dx - i_2 R'' = \\ = -\frac{d\Phi}{dt} dx = -L \frac{di}{dt} dx.$$

Но $i_2 R''$ есть ничто иное, какъ напряженіе e , измѣряемое на концѣ элемента линіи и должно быть принято съ отрицательнымъ знакомъ, такъ какъ оно уменьшаетъ потенциалъ въ избранномъ направленіи движенія часовой стрѣлки, а $i_1 R'$ напряженіе $e + de$ на другомъ концѣ линіи, слѣдовательно $e + de - e = de$ представляетъ паденіе напряженія на разстояніи dx вдоль проводовъ разсматриваемой линіи, или же паденіе напряженія на единицу длины линіи можно написать:

$$-\frac{de}{dx} = iR + L \frac{di}{dt} \dots \dots (1)$$

гдѣ $R = R_1 + R_2$ обозначаетъ омическое сопротивление а L коэффициентъ индукціи на единицу длины однофазной линіи, состоящей изъ двухъ проводовъ.

Измѣненіе силы тока на единицу длины вдоль проводовъ воздушной линіи будетъ равняться алгебраической суммѣ токовъ смѣщенія $C \frac{de}{dt}$ и отвѣтвленія λe и выражается уравненіемъ

$$-\frac{di}{dx} = \lambda e + C \frac{de}{dt} \dots \dots (2).$$

Еслибы приняли за положительное направленіе силы тока направленіе отъ приемной къ генераторной станціи, то уравненіе (1) выражалобы возрастаніе напряженія, а уравненіе (2) возрастаніе тока на единицу длины однофазной линіи.

Уравненія (1) и (2) представляютъ собою основныя уравненія, характеризующія вполнѣ распространеніе электрическаго переменнаго тока вдоль проводовъ воздушной линіи. Эти основныя уравненія рѣшаютъ вполнѣ задачу о передачѣ электрической энергии на большія разстоянія по

средствомъ переменнаго тока. Изъ вышеприведенныхъ основныхъ уравненій явствуетъ, что для данной системы линіи переменнаго тока измѣненіе напряженія, а также и измѣненіе силы тока вдоль проводовъ, для даннаго напряженія e и даннаго тока i , зависятъ только отъ электрическихъ постоянныхъ R , L , λ и C . По этому эти постоянныя можно называть «постоянными электрическими величинами линіи переменнаго тока», характеризующими эти линіи, какъ мы это дальше увидимъ.

Замѣтимъ, что уравненія (1) и (2) подобны тѣмъ, которыя встрѣчаются въ акустикѣ въ теоріи распространенія звуковъ, если предположить, что электрическое сопротивление соотвѣтствуетъ тренію, индукція инерціи среды, а емкость обратной величинѣ давленія.

Израсходованная энергія или потеря энергіи (или уменьшеніе энергіи) вдоль проводовъ воздушной линіи можетъ быть выражена уравненіемъ:

$$\frac{d(ei)}{dx} = -i \frac{de}{dx} - e \frac{di}{dx}.$$

Подставляя въ это уравненіе значенія для $\frac{de}{dx}$ и $\frac{di}{dx}$ получимъ, что

$$\frac{d(ei)}{dx} = (i^2 R + e^2 \lambda) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L + \frac{1}{2} e^2 C \right) \quad (3)^*.$$

Электрическая энергія $i^2 R$ представляетъ израсходованную въ проводахъ воздушной линіи въ видѣ тепла энергію, $e^2 \lambda$ израсходованную въ изолирующей средѣ энергію, величина $\frac{1}{2} e^2 C$ представляетъ возрастаніе электрической энергіи въ единицу времени на длину dx , а $\frac{1}{2} i^2 L$ возрастаніе магнитной энергіи на той же длинѣ. Какъ видно одна часть энергіи превращается по закону Джоуля въ тепло, а другая часть запасается въ магнитномъ и электростатическомъ поляхъ. Если λ и R обозначаютъ сопротивление и проводимость проводовъ и приемниковъ, то можно сказать, что выраженіе $(i^2 R + e^2 \lambda)$ представляетъ собою составляющую электрической энергіи, исполняющую работу при передачѣ электрической энергіи, а $(\frac{1}{2} i^2 L + \frac{1}{2} e^2 C)$ составляющую запасъ электрической энергіи, скопленной въ магнитномъ и электростатическомъ поляхъ.

Резюмируя все вышеизложенное, мы видимъ, что при передачѣ извѣстнаго количества электрической энергіи нужно израсходовать кромѣ передаваемой энергіи еще часть энергіи $i^2 R + e^2 \lambda$, чтобы преодолѣть электрическое сопротивление линіи и изолирующей среды, далѣе часть энергіи $\frac{1}{2} e^2 C$, чтобы образовать электрическое поле между проводами и проводами и землей, обнаруживающееся въ натяженіи среды, и наконецъ, часть энергіи $\frac{1}{2} i^2 L$ для образованія магнитныхъ полей, обнаруживающихся въ инерціи среды.

Кромѣ того, переменныя токи, проходяшіе по

проводамъ воздушной линіи, подвергаются не только потерямъ въ напряженіи, происходящимъ вслѣдствіе сопротивленія и противодѣйствующихъ электродвижущихъ силъ, но и потерямъ силы токовъ, происходящимъ вслѣдствіе отвѣтвленія черезъ воздухъ и изоляторы, а также вслѣдствіе заряжанія конденсаторовъ воздушной линіи. Но такъ какъ потери въ напряженіи происходящіе отъ противодѣйствующихъ электродвижущихъ силъ, отстаютъ относительно токовъ, производящихъ ихъ, а токи смѣшенія относительно производящихъ ихъ электродвижущихъ силъ, то слѣдуетъ, что при передачѣ электрической энергіи посредствомъ воздушной линіи переменнаго тока не только дѣйствующія величины, но и отставанія въ фазѣ силы тока относительно напряженія мѣняются отъ одной точки къ другой вдоль воздушной линіи. Легко убѣдиться, что въ двухъ разныхъ точкахъ воздушной линіи могутъ существовать одновременно въ данный моментъ не только разныя величины, но и совершенно противоположныя направленія силы тока.

Замѣтимъ еще, что уравненіе (3) даетъ намъ также и разъясненіе опаснаго возрастанія на пряженія, проявляющагося особенно при длинныхъ воздушныхъ линіяхъ переменнаго тока, когда линія внезапно выключается при полной нагрузкѣ. И въ самомъ дѣлѣ при внезапномъ прекращеніи тока въ такихъ линіяхъ или при короткомъ замыканіи вся запасенная въ потенциальномъ видѣ энергія $\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} Ce^2$ становится свободной, и эфиръ совершаетъ рядъ свободныхъ колебаній, производящихъ серію индуктируемыхъ вслѣдствіе этого электродвижущихъ силъ, какъ это мною было изложено въ моемъ трудѣ «О повышеніи напряженія въ электрическихъ сѣтяхъ вслѣдствіе явленія резонанса и свободныхъ колебаній» *). Эти повышенія напряженія могутъ достигнуть такихъ предѣловъ, что никакая изоляція не въ состояніи выдержать ихъ и слѣдствіемъ этого является обыкновенно пробиваніе изоляціи генераторовъ и двигателей.

Приступимъ теперь къ анализу основныхъ уравненій (1) и (2) и постараемся вывести для разныхъ системъ воздушныхъ линій переменнаго тока основныя уравненія, а потомъ вычислить для каждой данной системы электрическія постоянныя R , L , λ и C .

Начнемъ съ анализа:

1) Перваго основнаго уравненія

$$\frac{de}{dx} = Ri + L \frac{di}{dt}$$

и разсмотримъ какимъ измѣненіямъ подвергается напряженіе передаваемого переменнаго тока на всей длинѣ проводовъ воздушной линіи.

*) Докладъ сдѣланъ мною въ засѣданіяхъ въ Императорскомъ Русскомъ Техническомъ Обществѣ 14 и 21 января 1905 года.

Величина $\frac{de}{dx} = v$ представляет собою ничто иное, какъ падение потенциала на единицу длины въ данный моментъ t вдоль проводовъ линий, какъ это уже нами было указано, и вышеприведенное уравнение указываетъ, что v равняется алгебраической суммѣ: паденія потенциала, вызваннаго вслѣдствіе омическаго сопротивленія R и паденія потенциала происходящаго вслѣдствіе преодоленія индуктивнаго сопротивленія ωL . Если теперь желаемъ выразить падение потенциала въ дѣйствующихъ величинахъ, т. е. среднеквадратическихъ, то мы можемъ это сдѣлать въ видѣ векторнаго уравненія

$$V \triangleq RI + \omega LI$$

которое обозначаетъ, что векторъ RI долженъ быть геометрически сложенъ съ векторомъ ωLI *), для того, чтобы получить векторъ V , такъ же алгебраической зависимости мгновенныхъ величинъ соотвѣтствуетъ геометрическая зависимость среднеквадратическихъ величинъ.

Передаваемая сила тока I есть данная величина и намъ остается только вычислить величины R и L на единицу длины линіи, напримеръ, на 1 километръ для того, чтобы выразить падение напряженія на 1 километръ вдоль линіи переменнаго тока.

Вычислимъ во-первыхъ:

1. Омическое сопротивление. Провода воздушныхъ линій переменнаго тока дѣлаются обыкновенно изъ мѣди и прикрѣпляются на изоляторахъ на деревянныхъ или же желѣзныхъ столбахъ.

Для переменнаго тока небольшой частоты можно предположить, какъ это дѣлается для постояннаго тока, что токъ равномерно распространяется по сѣченію провода, т. е. что плотность тока δ на мм^2 постоянная величина. Если l обозначаетъ длину линіи въ километрахъ (к.лм.), s въ мм^2 сѣченіе провода, $\rho = 0,016 (1 + 0,004 t^0)$ удѣльное сопротивление мѣди, то сопротивление одного провода выразится

$$R_1 = \rho \frac{l}{s} 1000 \text{ ом}.$$

Если $v = ls$ представляетъ объемъ провода, то потери на явленія Джоуля на проводъ и 1 к.лм. будутъ:

$$I^2 R_1 = \rho \frac{l}{s^2} s I^2 1000 = 1000 \rho v \delta^2.$$

Въ Америкѣ, при передачѣ электрической энергіи весьма часто примѣняются алюминіевыя провода. Но такъ какъ удѣльное сопротивление алюминія 2,7, а мѣди 1,6, то слѣдуетъ въ случаѣ замѣны мѣдныхъ проводовъ проводами изъ алюминія принять сѣченіе послѣднихъ 1,7 раза

больше, или діаметръ въ 1,3 раза больше. Далѣе, такъ какъ удѣльный вѣсъ алюминія 2,75, а мѣди 8,9, то и вѣсъ алюминіеваго провода на 50% меньше вѣса, опредѣленнаго для мѣдныхъ проводовъ. Еслибы стоимость алюминія была бы на 50% меньше стоимости мѣди, то при одинаковыхъ качествахъ обонихъ, конечно, предпочитали бы всегда алюминій.

По А. Е. Канѣву, имѣются слѣдующія данныя для алюминіевыхъ проводовъ: удѣльный вѣсъ 2,7, проводимость относительно мѣди—при одинаковомъ сѣченіи 0,599, сопротивление разрыву на 1 кв. мм. 23 кгр. (для мѣди 39 кгр.).

При силѣ въ 10—12 кгр. на 1 кв. мм. получаются такія значительныя удлиненія, что ихъ можно принять за предѣлъ упругости.

Въ виду того обстоятельства, что провода, подверженные растяженію, удлиняются настолько, что получаютъ остающіяся удлиненія, при постройкѣ воздушныхъ линій изъ алюминія необходимо принимать большія предосторожности, тѣмъ болѣе, что при возрастаніи температуры алюминіевые провода значительно удлиняются.

Особенное вниманіе должно быть обращено на соединеніе проводовъ. Въ виду того, что алюминій въ высшей степени электроположителенъ, не можетъ быть допущена спайка концовъ провода. Провода могутъ соединяться только муфтами или зажимами изъ алюминія.

Замѣтимъ еще, что проводимость цѣлой линіи состоящей изъ мѣднаго провода, равняется проводимости мѣди; въ линіи же съ алюминіевыми проводами проводимость уменьшается на 10% сравнительно съ проводимостью алюминія. Это послѣднее обстоятельство указываетъ на необходимость избѣгать спайки.

Вслѣдствіе явленія Скина (Skin) дѣйствительное сопротивление R_{ef} проводовъ для переменнаго тока становится больше, чѣмъ омическое сопротивление R . По профессору М. Г. Ми (Mie) дѣйствительное сопротивление R_{ef} можно выразить уравненіемъ

$$R_{ef} = R_1 \left[1 + 0,0833 \left(\frac{2\pi \sim}{R_1} \right)^2 - 0,00556 \left(\frac{2\pi \sim}{R_1} \right)^4 \right]$$

гдѣ \sim частота переменнаго тока, а R_1 —омическое сопротивление на см. длину въ С.Г.С. единицахъ

$$R_1 = 10^9 \frac{\rho}{s} 0,01 = \frac{\rho}{s} 10^7.$$

Вычислимъ теперь

2. Коэффициентъ индукціи воздушныхъ линій переменнаго тока. Для вычисленія индукціи параллельныхъ воздушныхъ проводовъ существуютъ на практикѣ два метода, а именно:

1) Исходятъ изъ магнитнаго потока Φ_1 —2 который производится въ пространствѣ между осями двухъ проводовъ и отсюда вычисляется коэф-

*) Векторъ RI горизонталенъ и долженъ быть нанесенъ на оси абсциссъ (векторъ тока), а векторъ ωLI съ знакомъ \perp перпендикулярно къ оси абсциссъ.

коэффициентъ индукціи и паденіе напряженія между двумя проводами. При этомъ вычисленіи приходится имѣть дѣло только съ однимъ коэффициентомъ индукціи L , который также носитъ названіе коэффициента самоиндукціи.

2) Или исходятъ изъ магнитнаго потока Φ , который окружаетъ одинъ проводъ и отсюда вычисляется коэффициентъ индукціи одного провода и паденіе напряженія вдоль этого провода. При этомъ вычисленіи приходится имѣть дѣло съ тремя коэффициентами, а именно съ коэффициентами само L_s взаимной индукціи L_m и коэффициентомъ индукціи L .

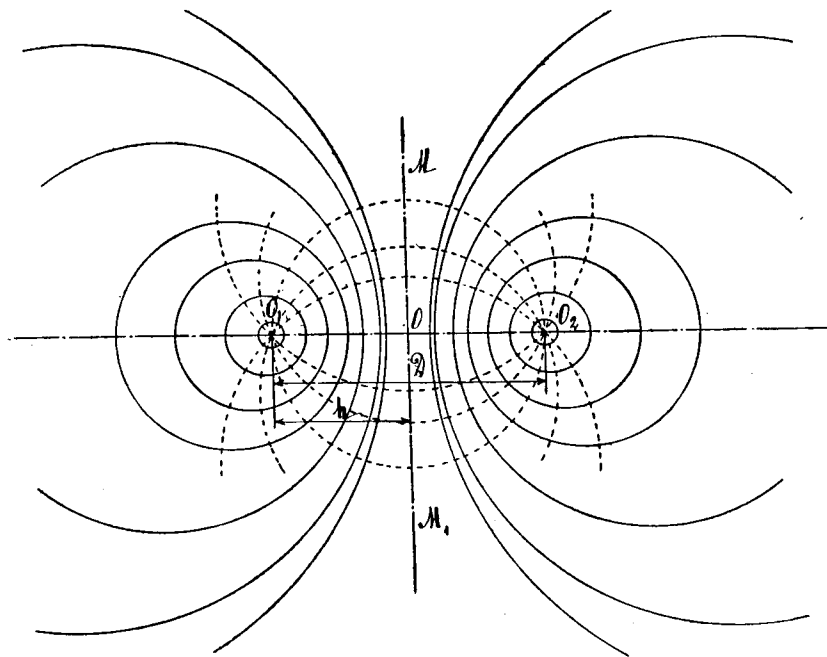
Сторонники первого метода заявляютъ, что

преимущества и какіе недостатки имѣть каждый изъ этихъ методовъ.

Начнемъ съ

А. Однофазныхъ линій. Рассмотримъ для этой цѣли простую.

1) Однофазную линію, состоящую изъ двухъ проводовъ, по одному на фазу. Пусть будетъ r въ см. радиусъ, а D въ см. разстояніе между осями проводовъ, проекція которыхъ представлена въ точкахъ O_1 и O_2 на фигурѣ 2. Согласно свойствамъ однофазной системы, отходящій токъ въ одномъ проводѣ i_1 равенъ и противоположенъ приходящему (обратному) току въ другомъ проводѣ i_2 въ каждый данный моментъ t , т. е. оба эти тока связаны между собою уравненіемъ



Фиг. 2.

паденіе напряженія и коэффициентъ индукціи одного провода величины, которыхъ нельзя измѣрять (что совершенно вѣрно), далѣе приводить, что коэффициентъ самоиндукціи при трехфазной системѣ линій не имѣетъ мѣста (что также вѣрно, но все-таки можно и здѣсь говорить о коэффициентѣ самоиндукціи одного провода), и наконецъ, высказываютъ, что переносъ значений коэффициентовъ само- и взаимной индукціи въ многосложныхъ линіяхъ переменнаго тока вызвало смѣшеніе, но не указываютъ въ чемъ состоитъ это смѣшеніе и рекомендуютъ при вычисленіи коэффициента индукціи исходить отъ магнитнаго потока, производимаго въ пространствѣ между проводами.

Въ по слѣдующемъ мы будемъ пользоваться обоими методами при вычисленіи коэффициента индукціи воздушныхъ линій переменнаго тока, и увидимъ насколько оправданы выше приведенныя замѣчанія и тогда становится яснымъ какія

$$i_1 + i_2 = 0 \text{ или же } i_1 = -i_2 = i.$$

Теперь нужно остановиться на положительномъ направленіи тока. Для того, чтобы имѣть точку опоры и для трехфазныхъ линій мы принимаемъ за положительное направленіе,—направленіе отъ генераторной gg_1 къ приѣмной станціи rr_1 на фигурѣ 1.

Если далѣе R_1 и R_2 обозначаютъ омическое сопротивленіе проводовъ на 1 км. длины, которое въ данномъ случаѣ одинаково для обоихъ проводовъ, то основное уравненіе (1) выразится

$$e_1 + i_1 R_1 - e_2 - i_2 R_2 = -\frac{d\Phi}{dt},$$

гдѣ e_1 и e_2 обозначаютъ напряженіе у концовъ линій, имѣющей 1 км. длины.

Чтоже касается положительнаго знака напряженія (разности потенциаловъ) и тока, то по вышесказанному можно принять за правило:

если прослѣдить электрическую цѣпь, фиг. 1, въ смыслѣ вращенія часовой стрѣлки, то токи, дѣйствующіе въ этомъ направленіи, получаютъ положительный знакъ, а разность потенциаловъ будетъ положительнаго знака тогда, когда въ вышеобозначенномъ направленіи (движенія часовой стрѣлки) происходитъ повышеніе потенциала; отрицательный знакъ придается току и напряженію въ противоположномъ случаѣ.

Но разность потенциаловъ $e_1 - e_2$ даетъ намъ паденіе напряженія v_{1-2} въ данный моментъ t и мы имѣемъ:

$$v_{1-2} = e_1 - e_2 = -i_1 R_1 + i_2 R_2 - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Но такъ какъ

$$-i_1 = i_2 = i, \text{ а } R_1 = R_2,$$

то слѣдуетъ

$$v_{1-2} = 2iR_1 - \frac{d\Phi}{dt} \text{ на } l \text{ км. длины.}$$

Остается еще опредѣлить магнитный потокъ Φ , образующійся въ пространствѣ $gg_1 rr_1$ фиг. 1. Этотъ потокъ Φ слагается изъ двухъ потоковъ, а именно магнитнаго потока Φ_1 , который порождается токомъ i_1 ; и магнитнаго потока Φ_2 , образуемаго токомъ i_2 , такъ что можно написать

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = L_1 i_1 + L_2 i_2.$$

Нужно теперь также остановиться и на вопросѣ о положительномъ знакѣ магнитнаго потока. За положительный магнитный потокъ будемъ считать тотъ, который дѣйствуетъ въ направленіи вращенія пробочника, совпадающаго съ направленіемъ тока и вращающагося въ направленіи движенія часовой стрѣлки. Слѣдовательно магнитный потокъ, Φ_2 долженъ быть принятъ съ отрицательнымъ знакомъ и тогда получимъ уравненіе

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = L_1 i_1 - L_2 i_2.$$

Но вслѣдствіе свойства однофазнаго тока $i_2 = -i_1 = i$ и вслѣдствіе симметріи данной линіи $L_1 = L_2 = L$, слѣдуетъ

$$\Phi = 2Li.$$

Вычислимъ теперь магнитный потокъ, который производится на протяженіи одного километра въ пространствѣ, ограниченномъ осями проводовъ. Для строгаго вычисленія коэффициента индукціи нужно прежде всего опредѣлить распредѣленіе тока по сѣченію провода. Но такъ какъ такой способъ вычисленія требуетъ длинныхъ формулъ и интеграловъ, то на практикѣ предпочитается менѣе строгій, но скорѣе ведущій къ цѣли путь, какъ это излагается въ трудѣ Галилео Феррарисъ (Galileo Ferraris) *Wissenschaftliche Grundzüge der Elektrotechnik*. Коэффициентъ индукціи опредѣляется, какъ среднее число изъ двухъ вычисленій, а именно во-первыхъ изъ вычисленія, основаннаго на пред-

положеніи, что токъ равномерно распредѣленъ по сѣченію провода, а во-вторыхъ изъ вычисленія сдѣланнаго въ предположеніи, что токъ сконцентрированъ въ очень тоненькомъ слоѣ на поверхности провода.

Каково бы ни было распредѣленіе тока по сѣченію проводовъ, лишь бы оно было симметрично относительно осей проводовъ, дѣйствующая сила H , въ любой точкѣ магнитнаго поля, производимаго токомъ i , опредѣляется уравненіемъ $H_1 = \frac{2i}{x}$, гдѣ x обозначаетъ разстояніе тока отъ разсматриваемой точки магнитнаго поля.

Силковыя линіи, образуемые токами протекающими по проводамъ, составляютъ двѣ системы круговъ, окружающихъ соотвѣтственные провода, какъ это указано на фиг. 2. Центры этихъ круговъ находятся на прямой, соединяющей проекціи осей OO_1 . Прямая MM_1 пересѣкаетъ линію OO_1 вертикально и дѣлитъ эту послѣднюю на двѣ половины; линія MM_1 также силовая линія, радіусъ которой безконечный.

Дѣйствующая магнитная сила H въ любой точкѣ магнитнаго поля, образованнаго токами i_1 и i_2 является равнодѣйствующей изъ составляющихъ силъ H_1 и H_2 , происходящихъ отъ токовъ i_1 и i_2 , слѣдовательно:

$$H = H_1 + H_2.$$

Полный магнитный потокъ Φ , развиваемый въ разсматриваемомъ пространствѣ равняется простому произведенію сѣченія этого пространства

$$\int_0^D ds = \int_0^D 1 \cdot dx \text{ на } H,$$

то есть,

$$\Phi = \int_0^D H \cdot ds = \int_0^D H_1 \cdot dx + \int_0^D H_2 \cdot dx.$$

а) Предположимъ пока, что токъ равномерно распредѣленъ по сѣченію проводовъ и вычислимъ отдѣльные интегралы между предѣлами 0 до r въ проводѣ O_1 , потомъ отъ r до $D-r$ въ діэлектрикѣ (воздухѣ) и наконецъ отъ $D-r$ до D во второмъ проводѣ O_2 .

Для предѣла $x < r$ получимъ

$$H_1 = 2i_g \frac{x}{r^2}, \quad H_2 = \frac{2i_g}{D-x}$$

слѣдовательно

$$\int_0^r H \cdot dx = 2i_g \left[\frac{1}{2} + \log \frac{D}{D-r} \right].$$

Для предѣла $r < x < (D-r)$ получимъ

$$H_1 = \frac{2i_g}{x}, \quad \text{а } H_2 = \frac{2i_g}{D-x}$$

слѣдовательно:

$$\int_r^{D-r} H dx = 2i_g \left[\log \frac{D-r}{r} + \log \frac{D-r}{r} \right]$$

Для предѣла $(D-r) < x < r$ слѣдуетъ

$$H_1 = \frac{2i_g}{x}, \quad H_2 = 2i_g \frac{D-x}{r^2}$$

слѣдовательно

$$\int_{D-r}^D H dx = 2i_g \left[\frac{1}{2} + \log \frac{r}{D-r} \right].$$

Слагая эти интегралы получимъ для

$$\Phi_{1-2} = 2i_g \left[2 \log \frac{D}{r} + 1 \right]$$

а для коэффициента индукции:

$$L'_{1-2} = \frac{\Phi}{i_g} = 2 \left[2 \log \frac{D}{r} + 1 \right].$$

б) Предположимъ теперь, что токъ сконцентрированъ въ тонкомъ слое по поверхности проводовъ, тогда можно тѣмъ же самымъ путемъ найти для величины коэффициента индукции:

$$L''_{1-2} = 2 \left[2 \log \frac{D}{r} \right].$$

Для дѣйствительнаго коэффициента индукции L можно принять среднее число изъ L' и L'' т. е.

$$L_{1-2} = \frac{L' + L''}{2} = 2 \left[2 \log \frac{D}{r} + 0,5 \right]$$

въ абсолютныхъ единицахъ. Замѣняя Неперовы логарифмы обыкновенными (Бригга) и выражая коэффициентъ индукции въ генри, получимъ для коэффициента индукции однофазной линіи съ двумя проводами въ генри на 1 км. длины величину:

$$L_{1-2} = \frac{1}{10^4} \left[2,4,6 \log \frac{D}{r} + 2,0,50 \right] = \\ = \frac{1}{10^4} \left[9,2 \log \frac{D}{r} + 1 \right]$$

гдѣ D и r выражены въ см.

Коэффициентъ индукции одного провода на 1 км. въ генри будетъ:

$$L_1 = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{D}{r} + 0,5 \right] \text{ генри на 1 км.}$$

Измѣненія магнитнаго потока $-\frac{d\Phi}{dt} = -L_{1-2} \frac{di}{dt}$ индуктируютъ въ проводахъ электродвижущія силы индукции, которыя создаютъ, какъ уже сказано было, индуктивное сопротивление разсматриваемой однофазной линіи. Для уравновѣшенія электродвижущей силы индукции нужно приложить напряжение равное, но обратнаго знака $\omega L_{1-2} J$.

Индуктивное сопротивление разсматриваемой однофазной линіи будетъ

$$x = 2\pi \sim L = 2\pi \sim (2L_1) = \frac{2\pi}{10^4} \left[9,2 \log \frac{D}{r} + 1 \right] \text{ омъ,}$$

а кажущееся сопротивление

$$z = \sqrt{R^2 + x^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L_{1-2})^2} = \\ = \sqrt{(2R_1)^2 + (2\omega L_1)^2} \text{ омъ.}$$

Кажущееся сопротивление опережаетъ силу тока (или же сопротивление R) на уголъ γ , опредѣляемый уравненіемъ

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{x}{R} = \frac{\omega L}{R}.$$

Какъ видно уголъ γ является постояннымъ для данной линіи и можетъ быть всегда опредѣленъ, какъ только электрическія постоянныя R и L этой линіи извѣстны.

Спрашивается какимъ способомъ могутъ быть опредѣлены электрическія постоянныя R , x и z на построенной однофазной линіи? Для рѣшенія этой задачи нужно замкнуть на короткое концы линіи на приемной станціи и измѣрить одновременно напряжение E_0 , израсходованную мощность P_0 на генераторной станціи, когда однофазная линіи передаетъ нормальный токъ J , на который рассчитаны провода. Пренебрегая емкостью воздушной линіи, можно написать слѣдующія уравненія:

$$P_0 = J \cdot E_0 \cos \varphi_0,$$

откуда

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{J \cdot E_0},$$

гдѣ уголъ φ_0 обозначаетъ отставаніе тока J относительно напряжения E_0 .

Эффективное сопротивление однофазной линіи вычисляется изъ отношенія:

$$J = \frac{E_0}{\sqrt{R_{\text{ef}}^2 + x^2}} = \frac{E_0 \cdot \cos \varphi_0}{R_{\text{ef}}}$$

откуда

$$R_{\text{ef}} = \frac{E_0 \cdot \cos \varphi_0}{J} \text{ омъ.}$$

Индуктивное сопротивление линіи будетъ:

$$x = \omega L_{1-2} = \frac{E_0 \cdot \sin \varphi_0}{J} \text{ омъ,}$$

а коэффициентъ индукции:

$$L_{1-2} = \frac{E_0 \cdot \sin \varphi_0}{2\pi \sim J \cdot l} \text{ генри на 1 км.}$$

Кажущее сопротивление равняется

$$z = \frac{E_0}{J}.$$

Сопротивленіе одного провода будетъ

$$R_1 = \frac{R_{\text{ef}}}{2},$$

а его коэффициентъ индукции

$$L_1 = \frac{L_{1-2}}{2}.$$

При этомъ методѣ вычисленія коэффициента индукции, гдѣ мы исходили отъ магнитнаго потока, образованнаго въ пространствѣ между осями проводовъ, намъ приходилось имѣть дѣло только съ однимъ коэффициентомъ индукции L , который мы въ состояніи и измѣрить на построенной уже однофазной линіи.

Но въ интересахъ общности является желательнымъ рассмотреть образованныя магнитныя поля и съ другой точки зрѣнія для того, чтобы коэффициентъ индукціи L могъ быть вычисленъ и для сложныхъ линий переменнаго тока, когда эти линии содержатъ нѣсколько параллельно соединенныхъ проводовъ на фазу.

Мы можемъ себѣ представить, что токъ i_1 , протекающій по отводящему проводу O_1 , еслибы онъ только одинъ существовалъ, образовилъ бы свое собственное магнитное поле $\Phi_1 = L_{s,1} i_1$, гдѣ $L_{s,1}$ обозначаетъ кажущійся коэффициентъ самоиндукціи, равный:

$$L_{s,1} = 2l \left[\log \frac{2l}{r} - 0,75 \right]$$

въ абсолютныхъ единицахъ, гдѣ l въ см. представляетъ длину, а r въ см. радиусъ провода; или же выражая L_s въ генри на 1 клм длины

$$L_{s,1} = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{2 \cdot 10^5}{r} - 1,5 \right] \text{ генри на 1 клм.}$$

Но такъ какъ на разстояніи D см. отъ отходящаго находится приходящій проводъ, по которому протекаетъ токъ i_2 , то токъ i_2 проявляетъ магнитное дѣйствіе на токъ i_1 . Это дѣйствіе можно разсматривать такъ, что вкругъ отходящаго провода существуетъ еще одинъ добавочный магнитный потокъ $\Phi_{m,2} = L_{m,2} \cdot i_2$, гдѣ $L_{m,2}$ обозначаетъ коэффициентъ взаимной индукціи провода 2 на проводъ 1 и равенъ

$$L_{m,2} = M = 2l \left[\log \frac{2l}{D} - 1 \right]$$

въ абсолютныхъ единицахъ, или, выражая $L_{m,2}$ въ генри на 1 клм. длины, получимъ:

$$L_{m,2} = \frac{1}{20^4} \left[4,6 \log \frac{2 \cdot 10^5}{D} - 2 \right] \text{ генри на 1 клм.}$$

Слѣдовательно весь магнитный потокъ Φ_1 , который окружаетъ отходящій проводъ въ данный моментъ t является равнодѣйствующимъ двухъ потоковъ $\Phi_{s,1}$ и $\Phi_{m,2}$, такъ что можно написать:

$$\Phi_1 = \Phi_{s,1} + \Phi_{m,2} = L_{s,1} i_1 + L_{m,2} i_2.$$

Точно такое же уравненіе должно существовать и для приходящаго провода въ данный моментъ t

$$\Phi_2 = \Phi_{s,2} + \Phi_{m,1} = L_{s,2} i_2 + L_{m,1} i_1.$$

Принимая во вниманіе, что благодаря свойству однофазной системы между мгновенными величинами токовъ должно существовать отношеніе: $i_1 = -i_2 = i$ и что благодаря симметріи однофазной линіи должно также существовать отношеніе

$$L_1 = L_2, L_{s,1} = L_{s,2} \text{ и } L_{m,1} = L_{m,2},$$

то слѣдуетъ:

$$\Phi = i (L_{s,1} - L_{m,2}) = i L_1,$$

откуда

$$L_1 = L_{s,1} - L_{m,2}$$

Подставляя для $L_{s,1}$ и $L_{m,2}$ вышеприведенныя выраженія, получимъ

$$L_1 = 2l \left[\log \frac{2l}{r} - 0,75 - \log \frac{2l}{D} + 1 \right] = \\ = l \left[2 \log \frac{D}{r} + 0,5 \right],$$

или выражая въ генри на 1 клм. длины коэффициентъ индукціи одного провода будетъ:

$$L_1 = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{D}{r} + 0,5 \right] \text{ генри на 1 клм.}$$

а коэффициентъ индукціи однофазной линіи, состоящей изъ двухъ проводовъ, по одному на фазу, будетъ:

$$L_{1-2} = 2L_1 = \frac{1}{10^4} \left[9,2 \log \frac{D}{r} + 1,0 \right] \text{ генри на 1 клм.}$$

Какъ видно тѣ же самыя выраженія были нами получены и раньше (смотри страницу 248).

Измѣненія магнитнаго потока Φ_1 индуктируютъ въ проводѣ O_1 электродвижущія силы индукціи, которыя могутъ быть выражены:

$$e'_s = - \frac{d\Phi_1}{dt} = -L_{s,1} \frac{di_1}{dt} - L_{m,2} \frac{di_2}{dt} = e_{s,1} + e_{m,2}.$$

Предполагая синусоидальныя токи, для которыхъ можно писать $i_1 = I_1 \sin \omega t$ и $i_2 = I_2 \sin (\omega t - 180^\circ)$, и подставляя ихъ въ послѣднее уравненіе, получимъ:

$$e'_s = -\omega L_{s,1} I_1 \cos \omega t - \omega L_{m,2} I_2 \cos (\omega t - 180^\circ).$$

На преодоленіе дѣйствія само-и взаимной индукціи въ отходящемъ проводѣ O_1 нужно по закону равенства дѣйствія и противодействія израсходовать напряженіе e_s , равное и обратнаго знака электродвижущей силы индукціи e'_s т. е.

$$e_s = \frac{d\Phi_1}{dt} = \omega L_{s,1} I_1 \cos \omega t + \omega L_{m,2} I_2 \cos (\omega t - 180^\circ),$$

или же

$$e_s = \omega L_{s,1} I_1 \sin (\omega t + 90^\circ) + \omega L_{m,2} I_2 \sin [(\omega t - 180^\circ) + 90^\circ].$$

Изъ этого уравненія явствуетъ, что напряженіе, уравновѣшивающее дѣйствіе самоиндукціи въ отходящемъ проводѣ O_1 опережаетъ токъ I_1 на 90° , и что напряженіе, идущее на преодоленіе взаимной индукціи приводящаго провода O_2 на проводъ O_1 также опережаетъ на 90° токъ I_2 .

Но такъ какъ алгебраической зависимости мгновенныхъ величинъ соотвѣтствуетъ геометрическая зависимость максимальныхъ или среднеквадратическихъ величинъ, то векторное уравненіе напряженія E_s будетъ

$$E_s \triangleq \omega L_{s,1} J_1 + \omega L_{m,2} J_2.$$

Вычисляя графически напряженіе E_s при помощи векторной діаграммы, мы находимъ, что векторъ $\omega L_{m,2} J_2$ долженъ быть нанесенъ въ

противоположномъ направленіи отъ вектора $\omega L_{s,1} J_1$. Алгебраически это отношеніе можно выразить, принимая во вниманіе, что $I_1=I_2=I$ или же $J_1=J_2=J$ можно написать:

$$e_s = \omega L_s I \sin(\omega t + 90) + \omega L_m I \sin(\omega t - 90).$$

Отсюда правило практики, встрѣчающееся въ учебникахъ по электротехникѣ, что векторъ напряженія, уравнившивающаго самоиндукцію одного провода опережаетъ токъ I на 90° , а векторъ напряженія, уравнившивающаго взаимную индукцію того же провода, запаздываетъ на 90° относительно тока I .

Но здѣсь слѣдуетъ замѣтить, что это правило можно примѣнять только къ однофазной системѣ, которая именно обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что токи I_1 и I_2 отстаютъ одинъ отъ другого на 180° . Для трехфазной системы это правило не можетъ быть примѣнено, какъ это, къ сожалѣнію, дѣлается нѣкоторыми авторами отъ того и происходятъ вышеупомянутыя смѣшенія, на которыя противники этого метода указываютъ. Въ трехфазной системѣ коэффициентъ взаимной индукціи L_m , не имѣетъ отрицательнаго характера и векторы напряженія, уравнившивающія дѣйствія взаимной индукціи не могутъ запаздывать относительно тока на 90° *), какъ это бываетъ въ однофазной системѣ, но должны быть снесены въ направленіи опережанія на 90° относительно вектора тока, какъ мы это дальше увидимъ.

Въ этомъ методѣ вычисленія коэффициента индукціи намъ приходится имѣть дѣло съ тремя коэффициентами, а именно L_s , L_m и L и нужно признаться, что коэффициенты L_s и L_m имѣютъ только теоретическое значеніе, такъ какъ на практикѣ не существуетъ способа, который бы позволялъ бы ихъ измѣрить. Возможно только измѣрить коэффициентъ L . Хотя введеніемъ не измѣряемыхъ, а только теоретическихъ коэффициентовъ само- и взаимной индукціи L_s и L_m настоящий методъ и представляетъ нѣкоторое неудобство, но все-таки нужно замѣтить, что съ другой стороны онъ имѣетъ и большія преимущества по сравненію съ первымъ методомъ. Въ настоящемъ методѣ паденіе напряженія вдоль каждаго провода можетъ быть вычислено, мы чувствуемъ, такъ сказать, какую роль каждый проводъ играетъ въ передачѣ электрической энергіи, что имѣетъ большое значеніе для линіи перемѣннаго тока, состоящей изъ нѣсколькихъ параллельно соединенныхъ проводовъ на фазу, какъ мы это дальше увидимъ.

Примѣръ. Для примѣненія выведенныхъ формулъ рассмотримъ примѣръ однофазной линіи, состоящей изъ отходящаго и приходящаго проводовъ въ $r=0,33$ см. радіуса и съ разстояніемъ въ $D=200$ см. между проводами.

*) Смотри Herzog-Feldmann. Berechnung elektrischer Leitungsnetze. Erstes Teil страница 339 фигура 247.

Омовое сопротивление каждаго провода при 20° на 1 км. длины будетъ:

$$R_1 = \rho \frac{1000}{s} = 0,016 (1 + 0,004 \cdot 20^\circ) \frac{1000}{34,213} = 0,505 \text{ омъ,}$$

а омовое сопротивление линіи на 1 км.

$$R = 2 \cdot R_1 = 1,01 \text{ омъ.}$$

Коэффициентъ индукціи одного провода на 1 км. равенъ

$$L_1 = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{200}{0,33} + 0,5 \right] = 0,00133 \text{ генри.}$$

Для контроля можно вычислить коэффициентъ самоиндукціи

$$L_{s,1} = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{2 \cdot 10^5}{0,33} - 1,5 \right] = 0,00251 \text{ генри}$$

и коэффициентъ взаимной индукціи

$$L_m = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{2 \cdot 10^5}{200} - 2 \right] = 0,00118 \text{ генри на 1 км.}$$

откуда

$$L_1 = L_s - L_m = 0,00251 - 0,00118 = 0,00133 \text{ генри на 1 км.}$$

Коэффициентъ индукціи однофазной линіи на 1 км. длины будетъ

$$L_{1-2} = 2 \cdot L_1 = 0,00266 = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ генри на 1 км.}$$

Если частота передаваемого тока равняется 25 періодамъ въ секунду, то индуктивное сопротивление будетъ

$$x_{1-2} = 2\pi \cdot L_{1-2} = 157 \cdot 2,66 \cdot 10^{-3} = 0,418 \text{ омъ на 1 км.}$$

Индуктивное сопротивление въ данномъ случаѣ большое, оно равно почти 40% омоваго сопротивления въ виду того, что и разстояніе между проводами большое $D=2$ метра, которое нужно соблюдать при примѣненіи высокаго напряженія напримѣръ, въ 5000 вольтъ, какое мы здѣсь предполагаемъ.

Если передаваемый токъ равняется 33 амперамъ, то напряженіе, преодолавающее омовое сопротивление будетъ

$$J \cdot R = 33 \cdot 1,01 = 33,33 \text{ влт. на 1 км.,}$$

а напряженіе, идущее на уравниваніе дѣйствія индукціи будетъ

$$E_0 = \omega L J = 0,418 \cdot 33 = 13,79 \text{ влт. на 1 км.}$$

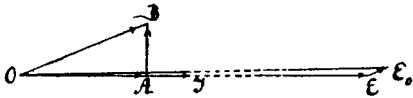
Паденіе напряженія вдоль воздушной однофазной линіи на 1 км. длины будетъ:

$$V_{1-2} J \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = 33 \sqrt{1,01^2 + 0,418^2} = 36,1 \text{ влт.}$$

Векторное уравненіе паденія напряженія можетъ быть выражено

$$V_{1-2} \hat{=} J R + \omega L J \hat{.}$$

Графическое вычисление падения напряжения при помощи векторной диаграммы указано на фиг. 3, гдѣ OJ представляет векторъ тока. По направлению вектора тока нанесенъ векторъ $J.R=33,33$ вольтъ $=33$ мм. $=OA$, а перпендикулярно къ вектору тока въ направлении опережанія отъ точки



Фиг. 3.

А нанесенъ векторъ $AB=\omega L J=13,79$ вольтъ $=13,8$ мм., слѣдовательно векторъ OB представляет по величинѣ и по фазѣ падение напряжения на 1 км. $OB=36,1$ мм. $=36,1$ вольтъ. Падение напряжения опережаетъ токъ на уголъ γ , опредѣленный изъ уравненія

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega L}{R} = \frac{0,418}{1,01} = 0,41$$

откуда

$$\gamma = 22^\circ 20'.$$

Предполагая, что напряжение на приемной станціи совпадаетъ въ фазѣ силою тока и что OE представляет это напряжение въ соответственномъ масштабѣ, то построивъ изъ точки E параллель къ OB и нанеся на ней $EE_0=OB$ въ прежнемъ масштабѣ отъ OE , получилъ векторъ OE_0 , представляющій напряжение однофазной линіи на 1 км. разстоянія отъ приемной станціи.

2. Однофазная линія состоящая изъ одного провода и земли въ роли обратнаго провода. Коэффициентъ индукціи одного провода, подвѣшеннаго на изоляторахъ на деревянныхъ столбахъ на высотѣ h см. отъ земли не равняется коэффициенту самоиндукціи L_s ни коэффициенту индукціи L_1 , потому что земля оказываетъ магнитное вліяніе на подвѣшенный проводъ.

Если въ фигурѣ 2 замѣнимъ проводъ O_2 токопроводящею поверхностью MM_1 (напр. землею), то отъ этого силовыя линіи провода O_1 нисколько не измѣнятся, слѣдовательно коэффициентъ индукціи провода O_1 остается одинъ и тотъ же какъ и въ предыдущемъ случаѣ, а коэффициентъ индукціи провода O_2 исчезнетъ, такъ какъ радиусъ провода MM_1 становится безконечнымъ. Подобный случай замѣны мы встрѣтимъ еще и въ параграфѣ о емкости и тамъ будетъ дано разъясненіе относительно электрическихъ явленій, которыя аналогичны магнитнымъ. Изъ этого слѣдуетъ, что относительно индукціи земля въ качествѣ обратнаго провода дѣйствуетъ точно такъ какъ проводъ, являющійся электрическимъ отраженіемъ подвѣшеннаго провода.

Слѣдовательно, коэффициентъ индукціи подвѣшеннаго провода въ генри на 1 км. выразится

$$L_1 = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{2h}{r} + 0,5 \right].$$

Если высота подвѣшеннаго провода равняется $h=700$ см., а радиусъ провода $r=0,33$ см., то коэффициентъ индукціи будетъ

$$L_1 = \frac{1}{10^4} \left[4,6 \log \frac{1400}{0,33} + 0,55 \right] = 0,00171 \text{ генри на 1 км.}$$

(Продолженіе слѣдуетъ).

Предстоящее переустройство электрическихъ сооружений въ Парижѣ.

Статья I. Троицкаго.

Какъ извѣстно, эксплуатація электрической энергіи въ Парижѣ была предоставлена въ концессионномъ порядкѣ нѣсколькимъ частнымъ компаніямъ, изъ которыхъ каждая взяла на себя освѣщеніе части города, имѣющую форму сектора съ вершиной въ центрѣ города, а основаніемъ у линіи укрѣпленій. Каждая изъ этихъ компаній, образовавшихся въ ту пору, когда преимущества и недостатки той или другой системы распределенія еще не были выяснены, рѣшила предстоящую ей задачу по своему и поэтому врядъ ли въ какомъ городѣ можно найти такое разнообразіе въ этомъ отношеніи.

Такъ, на примѣръ, „Compagnie Edison“ воспользовалась трехпроводной системой, „Société pour l'éclairage et la force par l'électricité“ построила внутри города 5 станцій, работающихъ на двухпроводную сѣть. „Société des secteurs des Champs Elysées“ устроило станцію переменнаго тока, а „Société du secteur de Clichy“ распределяетъ энергію по пятипроводной системѣ.

Срокъ этимъ концессіямъ истекаетъ въ 1907 году для 4-хъ компаній, въ 1908 г. для пятой, а въ 1912 г. для „Société du secteur de la Rive Gauche“, и при парижскомъ муниципальномъ совѣтѣ образована была въ началѣ текущаго года спеціальная финансовая и техническая комисиія, на которую возложено было рѣшить, на какихъ основаніяхъ должно будетъ въ будущемъ реорганизовано снабженіе Парижа электрической энергіей. Само собою разумѣется, что не можетъ быть и рѣчи о томъ, чтобы продолжитъ безъ всякихъ измѣненій на дальнѣйшее время концессіи теперешнихъ компаній. Въ настоящее время въ Парижѣ насчитывается около 30000 торговыхъ заведеній и болѣе 25000 квартиръ, цѣною выше 500 фр. въ годъ, между тѣмъ, какъ общее число абонентовъ во всѣхъ „секторахъ“ достигаетъ всего 3300.

Благодаря такому малому расходу тока, большимъ начальнымъ затратамъ при постройкѣ станцій, достигшимъ 1000 фр. на квт. (въ то время, какъ теперешнія централи обходятся не болѣе 250 фр. за квт.) небольшому сроку амортизаціи, устарѣвшему техническому устройству—себѣ стоимостю на станціи электрической энергіи, вырабатываемой этими компаніями достигаетъ 10—20 сантимовъ за квт.-часъ, между тѣмъ какъ цѣна эта не должна превосходить 5 сантимовъ за квт.-часъ. Всѣ указанныя техническія несовершенства, изъ которыхъ главная—отсутствіе централизаціи, однообразной системы распределенія и машинъ надлежащей мощности—таковы, что исправлены быть не могутъ.

Точно также невозможно, построивъ новую центральную станцію, воспользоваться существующей сѣтью проводовъ, такъ какъ системы распределенія во всѣхъ секторахъ неодинаковы и, кромѣ того, существующія магистраль и безъ того уже слишкомъ перегружены. Такими образомъ придется останова-

Къ такому именно заключенію мы пришли бы на основании общихъ теоретическихъ соображеній. Но вѣдь одно—это установить идеальную программу для какого нибудь американскаго города, а другое—примѣняться къ условіямъ такого города, какъ Парижъ.

Правда, при помощи техническихъ усовершенствованій мы можемъ вдвое уменьшить стоимость энергии на станціи, но для потребителя до этой стоимости нѣтъ никакого дѣла: ему важно, сколько придется платить у себя дома, и въ эту плату, какъ мы дальше увидимъ, входятъ расходы на содержаніе, канализацію и т. д., а главное амортизація, и расходы на уплату процентовъ по тѣмъ займамъ, которые городу придется сдѣлать для выполненія грандіозныхъ проектовъ, вродѣ такого, какой былъ предложенъ „Всеобщей компаніей электричества“ въ Берлинѣ: между тѣмъ, какъ станціи всѣхъ старыхъ обществъ переходятъ къ городу по истеченіи срока концессіи совершенно даромъ.

Такимъ образомъ вопросъ этотъ не можетъ быть рѣшенъ à priori, и необходимо выбрать не только технически, но и экономически наиболѣе выгодную для Парижа систему.

Этотъ именно вопросъ и былъ предложенъ на разрѣшеніе технической комиссіи, закончившей свои работы 11 февраля текущаго года. Въ нижеслѣдующемъ мы будемъ опираться на докладъ, составленный этой комиссіей и представленный ею парижскому городскому совѣту. Докладъ этотъ разбивается на 4 части, въ которыхъ соотвѣтственно разсматривается производство, распредѣленіе, стоимость и тарификація электрической энергии. Въ основаніе всѣхъ предварительныхъ расчетовъ положена предполагаемая мощность 80—10000 квт.

Въ виду того, что максимальныя единицы строятся въ настоящее время мощностью не болѣе 7000 квт., то число машинъ вмѣстѣ съ запасными достигнетъ 14—15. А. Е. Г. проектировала поставить турбо-альтернаторы въ 15000 квт. каждый, но такихъ машинъ построено еще не было.

Выгоды всякой центраціи состоятъ въ уменьшеніи стоимости надзора и общихъ вспомогательныхъ устройствъ, но съ другой стороны недостатки ея въ томъ, что всякія случайности, напримѣръ, пожаръ, представляютъ гораздо болѣе риску и опасности. Такимъ образомъ выгоды централизациі возрастаютъ только до извѣстнаго предѣла, каковымъ въ нашемъ случаѣ, какъ это слѣдуетъ изъ практики болѣешихъ станцій, является 6—8 машинъ. При дальнѣйшемъ увеличеніи выгоды эти теряются, всѣ канализаціи, распредѣлительныя доски, водоснабженія должны устраиваться отдѣльно, такъ что общія станція будетъ представлять собою ничто иное, какъ совокупность нѣсколькихъ отдѣльныхъ, другъ отъ друга независимыхъ, но рядомъ расположенныхъ станцій. Поэтому логичнѣе, по мнѣнію комиссіи, остановиться не на одной, но на трехъ центральяхъ, помѣстивъ каждую изъ нихъ въ наивыгоднѣйшее мѣсто обслуживаемаго ею района. Рискъ несчастной случайности будетъ такимъ образомъ предотвращенъ въ значительной мѣрѣ, и будетъ соблюдена извѣстная экономія въ магистральныхъ.

Что касается выбора двигателей, то вошедшіе теперь въ моду газовые двигатели, хотя и оказываются довольно экономичными при полной нагрузкѣ, тѣмъ не менѣе не вполне пригодны для цѣлей электрическихъ. Они недостаточно эластичны, не вполне легко приспособляются и слѣдуютъ за измѣненіями нагрузки и обладаютъ малою равномерностью хода. Вслѣдствіе этого комиссія остановилась на паровыхъ турбинахъ, предпочитая ихъ паровымъ машинамъ. Дѣйствительно, паровыя машины подобной мощности, именно въ 5—7000 квт., представляютъ изъ себя соединеніе на одномъ валу работы нѣсколькихъ цилиндровъ, т. е. ничто иное, какъ совокупность нѣсколькихъ машинъ, а это вызываетъ необходимость

въ усиленномъ надзорѣ, неговоря уже о самой сложности конструкціи. Что касается размѣровъ машинъ, то съ одной стороны мощность каждой изъ нихъ должна быть возможно болѣе, а съ другой стороны число ихъ не должно быть слишкомъ мало, дабы каждая могла работать въ наивыгоднѣйшихъ условіяхъ, т. е. при нормальной нагрузкѣ; въ виду этого эксперты остановились на единицахъ, мощностью въ 5000 квт. Нечего и говорить, что выборъ того или другого двигателя имѣетъ чрезвычайно важное значеніе для всего устройства станціи и ея расположенія. Именно, примѣненіе паровыхъ турбинъ и выгодная ихъ эксплуатация возможны лишь въ томъ случаѣ, когда конденсація и особенно разрѣженіе въ конденсаторахъ будутъ насколько возможно совершенны. Это условіе требуетъ, чтобы количество имѣющейся воды было ничѣмъ не ограничено и чтобы температура воды этой была бы по возможности низка. Дѣйствительно, снабженіе водой гораздо важнѣе даже, чѣмъ, напримѣръ, снабженіе топливомъ. Топливо достать можно всегда, хотя бы во время кризиса: это вопросъ денегъ, временнаго увеличенія издержекъ производства; когда же нѣтъ воды, то ея не доставишь ни за какія деньги и работа должна стать. Конечно, можно было бы примѣнить каскадные или вспрыскивающіе конденсаторы, но эти сложныя и дорогія устройства неудобны еще тѣмъ, что дѣйствіе ихъ зависитъ отъ гигрометрическаго состоянія воздуха, и напримѣръ, во время дождя работаютъ они очень плохо. Такъ какъ расходъ пара въ турбинахъ увеличивается съ уменьшеніемъ разрѣженія гораздо быстрѣе, чѣмъ въ поршневыхъ машинахъ, то, слѣдовательно, на основаніи вышеприведенныхъ соображеній, станціи должны быть расположены въ непосредственномъ содѣйствіи съ Сеной; каналы St.-Denis и St.-Martin для этой цѣли негодятся, вслѣдствіе малаго расхода воды. Подвозка топлива можетъ также производиться водою при помощи шланговъ. Никакихъ споровъ не могъ возбудить родъ первичнаго тока. Первичный токъ, вырабатываемый на центральяхъ, долженъ быть переменный, многофазный, хотя въ послѣднее время съ усовершенствованіемъ коллекторныхъ двигателей однофазнаго тока, этотъ послѣдній грозитъ вытѣснить всѣ другіе, особенно въ трамваяхъ. Число фазъ особенной роли не играетъ, такъ какъ при одномъ и томъ же количествѣ передаваемой энергии и при томъ же напряженіи какъ двухфазныя, такъ и трехфазная системы требуютъ одного и того же количества мѣди. Выборъ напряженія зависитъ, конечно, отъ дальности передачи, и оно будетъ заключаться въ предѣлахъ между 8000 и 12000 влт. Это напряженіе можетъ быть получено непосредственно въ альтернаторахъ, безъ промежуточнаго повышенія въ трансформаторахъ.

Такъ какъ число періодовъ или частота первичнаго тока выбирается въ зависимости отъ цѣлей эксплуатации, отъ назначенія тока, то о немъ мы скажемъ въ соотвѣтствующемъ мѣстѣ, а теперь перейдемъ къ распредѣленію энергии.

Изъ протоколовъ засѣданія комиссіи видно, что по вопросу о томъ, какой долженъ быть вторичный токъ, мнѣнія раздѣлились, и поэтому пришлось въ качествѣ критерія поставить уже не общія соображенія, но специально парижскія условія. Обращаясь къ нимъ, комиссія подчеркиваетъ, что самое большое потребленіе электричества можно ожидать въ наиболѣе оживленныхъ кварталахъ, какъ напримѣръ, въ томъ кольцѣ, которое образовано цѣпью болѣешихъ бульваровъ съ одной стороны и рѣкой Сеной—съ другой. Съенія магистралей тамъ должны будутъ имѣть очень болѣе размѣры. Окружающіе кварталы, какъ расположенные по лѣвому берегу Сены, такъ и тянущіеся отъ болѣешихъ бульваровъ къ бульварамъ внѣшнимъ, потребуютъ также очень значительнаго расхода тока, хотя и меньшаго, чѣмъ въ предыдущемъ случаѣ. Укажемъ здѣсь, что канали-

зация переменного тока большой силы и малаго напряжения представляет значительныя трудности; очень трудно исключить влияние индукции, сопряженной съ значительной емкостью кабелей, какъ на распределительныхъ доскахъ въ подстанціяхъ, такъ и въ голыхъ проводахъ; что же касается бронированныхъ кабелей, то диаметръ ихъ не можетъ быть пока полученъ выше извѣстнаго номера, и для получения потребнаго сѣченія придется брать ихъ въ значительномъ числѣ, что увеличитъ издержки. Правда, въ пользу переменнаго тока съ подстанціями говорить то, что трансформаторы переменнаго тока дешевле и имѣютъ высшую отдачу, чѣмъ постоянного, но за то съ другой стороны то, что мы выиграемъ на стоимости оборудованія подстанцій, мы потеряемъ на канализации. Дѣйствительно, для постоянного тока потребно три провода, изъ которыхъ нулевой можетъ имѣть половинное сѣченіе; между тѣмъ, для трехъ или четырехъфазнаго распределенія надо будетъ четыре провода. Что же касается потерь вслѣдствіе той или другой отдачи, то она составляетъ тотъ или другой % переменныхъ издержекъ, а въ дальнѣйшемъ мы увидимъ, какую малую долю они составляютъ общихъ издержекъ производства. Если приобрести ко всему этому, что эти кварталы освѣщались и раньше постояннымъ токомъ, и что многія проводки, переходящія теперь въ силу истеченія срока концессій къ городу, находятся еще въ прекрасномъ состояніи, то станетъ вполне понятнымъ, почему коммиссія остановилась на постоянномъ токѣ, какъ системѣ вторичнаго распределенія въ наиболѣе населенныхъ кварталахъ. Обращаясь же къ кварталамъ менѣе оживленнымъ вплоть до предѣлствій, мы замѣтимъ, что здѣсь упадать будетъ спросъ на освѣщеніе и возрастать спросъ на двигательную силу, въ виду того, что именно здѣсь сосредоточены различныя мелкія промышленныя заведенія. Въ виду того, что разстоянія между отдѣльными центрами потребленія здѣсь гораздо значительнѣе, то уже стоимость проводки имѣетъ большое значеніе, и коммиссія предлагаетъ въ этихъ кварталахъ устроить отдѣльныя небольшія подстанціи для пониженія напряжения тока въ главнѣйшихъ, относительно наиболѣе населенныхъ пунктахъ. Кабели, идущіе въ эти подстанціи, должны будутъ проходить по главнѣйшимъ улицамъ, причѣмъ для каждаго болѣе или менѣе значительнаго потребителя (не менѣе 10—20 квт.) можно будетъ поставить отдѣльный трансформаторъ, питаемый непосредственно отъ кабеля; всѣ же мелкіе абоненты будутъ получать токъ уже изъ вышеупомянутыхъ небольшихъ подстанцій.

Несмотря на кажущуюся сложность такой системы, ей слѣдуетъ отдать предпочтеніе, такъ какъ выгоды, представляемая ею, таковы, что не слѣдовало бы пожертвовать ими исключительно въ пользу большаго однообразія распределенія.

При выборѣ системы распределенія приходится выбирать между двухпроводной въ 110 влт., трехпроводной 2,110 влт. и, наконецъ, пятипроводной въ 4,110 влт. При этотъ въ качествѣ принципа было принято, что все должно быть проектировано такъ, чтобы въ полнѣ обезпечить постоянство напряжения въ сѣтяхъ абонентовъ. Двухпроводная система, требующая слишкомъ много мѣди, отпадаетъ сама собою, равно какъ и пятипроводная; эта послѣдняя неудобна въ томъ отношеніи, что довольно трудно регулировать сѣть такъ, чтобы напряжение на всѣхъ четырехъ линіяхъ было бы одинаково, а еще труднѣе устроить такъ, чтобы и нагрузку можно было бы равномерно распределить на всѣ четыре сѣти, отчего именно и зависитъ отсутствие колебаній въ напряженіи. Такъ какъ хорошее дѣйствіе лампъ и двигателей, а слѣдовательно и экономичность устройства всецѣло зависятъ отъ постоянства напряжения, то коммиссія предлагаетъ въ своемъ докладѣ трехпроводную систему, гдѣ вышеприведенныхъ недостатковъ нѣтъ, и

все регулированіе легко можетъ быть сдѣлано автоматическимъ. Особенно труднымъ является вопросъ о выборѣ напряжения для вторичныхъ сѣтей: 220 влт. или 110 влт. Доводы за напряженіе въ 220 влт. суть слѣдующіе:

1. Существующіе кабели легко могутъ выдержать и напряженіе въ 220 в., такъ что увеличится вдвое количество передаваемой ими энергіи безъ увеличенія пока ихъ размѣровъ.

2. Сфера дѣйствія каждой подстанціи возрастетъ вдвое, а посему и число ихъ можетъ быть соответственно уменьшено, а такъ какъ онѣ должны быть расположены въ самыхъ оживленныхъ пунктахъ, то экономія полученная такимъ образомъ будетъ очень велика.

3. Большія машины постоянного тока легче построить на 220 влт., чѣмъ на 110.

Но съ другой стороны:

1. Лампы накаливанія гораздо менѣе долговѣчны и экономичны при 220 влт., чѣмъ при 110. Произведенные коммиссіей специально для выясненія этого вопроса опыты доказали, что лампы на 110 влт., на 20% выгоднѣе лампъ въ 220 влт. *).

2. Дуговыя лампы, работающія при 40—45 в. могутъ послѣдовательно работать при напряженіи 220 в. очевидно лишь тогда, когда число ихъ послѣдовательно соединенныхъ будетъ не менѣе 4—5. Между тѣмъ, какъ при 110 влт., уже группа въ 2 лампы работаетъ достаточно хорошо.

3. Двигатели малой мощности обходятся дороже при напряженіи въ 220 влт. и, наконецъ,

4. Возможность короткихъ замыканій, какъ въ сѣти, такъ и у абонентовъ менѣе при 110 влт., чѣмъ при 220.

Конечно, всѣ эти послѣдніе доводы не выдерживаютъ серьезной критики; меньшая долговѣчность лампъ значенія не имѣетъ, такъ какъ цѣна ихъ теперь сведена до ничтожной цифры. Если лампы при 220 влт. менѣе экономичны, то за то экономія на постоянныхъ расходахъ такова, что она въ значительной степени, если не совсѣмъ, покроетъ этотъ убытокъ.

Всѣ эти соображенія, казалось бы, не оставляя никакого сомнѣнія въ томъ, что слѣдуетъ принять напряженіе въ 220 влт., и поэтому кажется нѣсколько страннымъ окончательное рѣшеніе коммиссіи въ пользу 110 влт., тѣмъ болѣе, что въ резюмируемомъ докладѣ, какъ основаніе для этого рѣшенія, приводится лишь то, что передѣлка всѣхъ установокъ была бы сопряжена съ слишкомъ большими неудобствами для потребителя.

Многочисленныя подстанціи для трансформирования переменнаго тока въ постоянный предполагаются, гдѣ только возможно, помѣстить въ муниципальныхъ зданияхъ, такъ какъ эксплуатация ихъ не сопряжена ни съ доставкой топлива ни съ другими неудобствами; какъ дымъ, такъ и шумъ здѣсь отсутствуютъ.

Трансформация тока будетъ производиться при помощи синхронныхъ или асинхронныхъ двигателей, соединенныхъ съ генераторами постоянного тока; такое устройство, по мнѣнію коммиссіи, выгоднѣе, нежели примѣненіе вращающихся преобразователей (коммутатрисъ), вслѣдствіе болѣе легкаго регулированія. Разница въ стоимости того и другого практически незначительна. Каждая изъ подстанцій будетъ обслуживать свой районъ при помощи кабелей слѣдующаго типа: провода, обернутые въ прорезиненную ткань, заключенную въ свинецъ; все это бронировано листовымъ желѣзомъ. Сѣть одной подстанціи будетъ соединяться съ сѣтью смежныхъ подстанцій, только въ нѣсколькихъ немногочисленныхъ точкахъ, въ каждой изъ которыхъ будетъ помѣщенъ автоматическій прерыватель на случай перегрузки.

При выборѣ системы распределенія переменнаго

тока въ сѣтяхъ подстанцій, приходится сталкиваться съ тѣми же системами, какъ и въ случаѣ постоянного тока; именно приходится выбирать между двухфазной и трехфазной системами распределенія. Обѣ эти системы одинаково допускаютъ присоединеніе къ сѣти двигателей небольшой мощности; въ смыслѣ освѣщенія и та и другая оказываются ниже простого однофазного тока, такъ какъ требуютъ распределенія нагрузки между нѣсколькими цѣпями. Канализація трехфазнымъ токомъ потребуетъ 4 провода, изъ которыхъ одинъ нулевой. Слѣдовательно, нагрузку придется равномерно распределить на каждую изъ трехъ фазъ, и отъ степени совершенства этого распределенія будетъ зависеть постоянство напряженія. Но, къ сожалѣнію, нагрузка эта постоянна, подвержена измѣненіямъ въ каждый данный моментъ. Маленькіе двигатели, питаемые отъ крайнихъ проводовъ, будутъ между зажимами имѣть напряженіе въ 190 вольтъ, выше котораго не слѣдовало бы допускать въ установкахъ частныхъ лицъ.

Система двухфазного тока могла бы быть осуществлена двоякимъ способомъ: или при помощи пяти проводовъ, изъ которыхъ одинъ—нулевой, или при помощи 4 проводовъ, образующихъ двѣ отдѣльныя двухпроводныя сѣти. Комиссія въ своемъ докладѣ отбрасываетъ пятипроводную систему по тѣмъ же причинамъ, какъ и въ случаѣ постоянного тока, и поэтому мы на этомъ не останавливаемся. Во второмъ способѣ, т. е. въ совокупности двухъ однофазныхъ системъ придется эквilibрировать всего двѣ сѣти, благодаря чему эта система имѣетъ преимущество надъ системой трехфазного тока въ смыслѣ меньшихъ колебаній напряженія въ приборахъ потребления. Въ этомъ случаѣ напряженіе между зажимами двигателей будетъ 110 влт., а напряженіе во всѣхъ изоляціяхъ 55 вольтъ. Но, съ другой стороны, объемъ мѣди въ магистральныхъ выйдетъ въ этомъ случаѣ нѣсколько больше, что не можетъ имѣть особенно существеннаго значенія, да и кромѣ того, можно будетъ воспользоваться однимъ общимъ проводомъ, что не можетъ, по мнѣнію комиссіи, быть сопряжено съ какими-либо практическими неудобствами.

Число періодовъ или частота переменнаго тока не должна быть меньше 40, во избѣжаніе миганія лампъ; въ настоящее время повсюду примѣняютъ 50 періодовъ въ секунду, и несомнѣнно слѣдовало бы примѣнить его и здѣсь, хотя компанія Sectar Sud и Sectar Ouest примѣняли токъ въ 42 періода. Примѣненіе 50 періодовъ только улучшить работу дуговыхъ лампъ, уменьшить стоимость двигателей данной мощности, уменьшить потери въ желѣзѣ трансформаторовъ, вслѣдствіе разсѣянія магнитныхъ потоковъ. Такимъ образомъ для вторичной, а слѣдовательно и для первичной сѣти, для всѣхъ машинъ число періодовъ должно быть равно пятидесяти.

Переходя теперь къ третьей части доклада, гдѣ исчисляется стоимость энсргіи, необходимо замѣтить, что въ настоящее время не существуетъ оборудованія, которое бы по размѣрамъ и по характеру подходило бы къ проектируемому. Вслѣдствіе этого, дальнѣйшія выкладки, опирающіяся на существующія устройства, являются результатами экстраполированія существующихъ практическихъ данныхъ, а слѣдовательно въ значительной степени приближительны; кромѣ того, цифры эти относятся къ полной и установившейся работѣ, которая будетъ имѣть мѣсто лишь черезъ нѣсколько лѣтъ эксплуатаціи.

Стоимость энергіи слагается изъ издержекъ постоянныхъ: % на капиталъ, затраченный на устройство, амортизацію машинъ и зданій, стоимости администраціи и издержекъ переменныхъ; на топливо, смазку и т. п.

Основной капиталъ затраченный на сооруженіе, по даннымъ доклада комиссіи слѣдующій:

Центральныя станціи, мощностью въ 7000 квт., считая по 500 фр. за квт., обойдутся въ 35.000.000 фр.

Подстанціи: машины и зданія, считая по 150 фр. за квт.	10.500.000 "
Канализація въ высокогаго и низкаго напряженія (не считая отвѣтвенной и счетчиковъ) по 700 фр. за квт. . .	49.000.000 "
	94.500.000 "
Различныя издержки	5.500.000 "
Итого	100.000.000 фр.

Итакъ стоимость сооруженій выражается въ круглыхъ числахъ 100.000.000 фр., т. е. по 1430 фр. за киловаттъ максимальной мощности.

Считая по 6% годовыхъ, мы получимъ, что % на затраченный капиталъ выразится суммою въ 6.000.000 франковъ.

При исчисленіи амортизаціи отдѣльныхъ частей сооруженія были приняты слѣдующіе сроки:

Смѣна котловъ черезъ 10 лѣтъ	
" машинъ " 15 "	
Смѣна канализаціи черезъ 35 "	
" зданій черезъ 35 лѣтъ	

Не приводя здѣсь подробныхъ выкладокъ, скажемъ лишь, что подсчетъ приводитъ къ тому, что амортизація составитъ 3,35%, т. е. для капитала въ 94.500.000 фр. это составитъ 3.165,750 фр.

Переходимъ теперь къ издержкамъ эксплуатаціи, причемъ принято, что издержки на

Топливо, считая по 1,5 кгр. на каждый добытый, или по 2,25 кгр. на каждый проданный киловаттъ + смазка, составляющая 10% стоимости топлива и другія издержки	4,95 с. на к.-ч. 40% "
Персональ	4,33 " " " 35 "
Содержаніе и общіе расходы	3,09 " " " 25 "
Администрація и коммерческія расходы	3,09 " " " — "
	15,46 ф. " " — "

Для того, чтобы изъ этихъ данныхъ вывести во сколько обойдется каждый киловаттъ проданной энергіи, необходимо принять во вниманіе еще такъ называемое использование матеріала, коэффициентъ нагрузки, т. е. отношеніе квт.-часовъ, проданныхъ въ теченіе года, къ тому числу, которое могло бы быть продано, если бы станція была бы вполне загружена цѣлый годъ, т. е. если бы діаграмма ея представляла бы прямую линію съ максимальной ординатой. Для удобства этотъ коэффициентъ, зависящій отъ того, на что примѣняется электрической токъ, можетъ быть выраженъ не отвлеченно, но въ часахъ, т. е. напримѣръ, если мы скажемъ, что коэффициентъ этотъ равенъ для того или другого учрежденія x часамъ, то это значитъ, что въ продолженіи года это учрежденіе тратитъ такое количество энергіи, которое оно могло бы потребить не въ годъ, а въ x часовъ, если бы работали всѣ находящіяся въ немъ лампы или двигатели. Этотъ коэффициентъ имѣетъ слѣдующія величины для разныхъ учреждений *).

Освѣщеніе:	
конторы и частныя квартиры	200—500 час.
магазины	500—750 "
кафе и театры	750—1500 "
уличное освѣщеніе	1800—3400 "
двигательная сила	1000—3000 "

Въ среднемъ можно для Парижа принять 750 часовъ, такъ что все количество проданной энергіи со-

ставить 7000 квт. × 750 часов = 52.500,000 квт.-часовъ.
Согласно предыдущему стоимость этихъ 52,5 милл. киловаттъ составитъ изъ слѣдующихъ слагаемыхъ:

Проценты на капиталъ . . .	6.000,000	фр.
Амортизация сооружений . .	3.160,000	"
Издержки эксплуатаціи, по		
0,1546 фр. за квт.-часъ . . .	8.116,500	"

Итого . . 17.282,250 фр.

Отсюда получимъ, что каждый киловаттъ будетъ себѣ стоить $\frac{17.282,250}{52.500,000} = 0,329$ или около 33 сантимовъ.

Переходя къ изложению той части доклада, гдѣ разбирается вопросъ о тарификаціи электрической энергіи, мы напомнимъ читателямъ, что въ „Электричествѣ“ мы приводили уже довольно подробно разборъ различныхъ тарифныхъ формулъ на электрическую энергію *) Нѣкоторыя изъ этихъ разсужденій повторяются и въ послѣдней части резюмируемаго доклада. При установленіи нормальнаго тарифа слѣдуетъ принять, какъ основаніе, что покупатель долженъ платить сумму пропорціональную тому, во сколько обходится станціи потребляемая имъ энергія, т. е. онъ долженъ участвовать, какъ въ постоянныхъ, такъ и въ переменныхъ издержкахъ, т. е. тарифная формула, логически говоря, должна имѣть видъ $A + Bx$, гдѣ A означаетъ сумму, уплачиваемую абонентомъ за вызываемыя имъ постоянныя издержки, независящія отъ квт.-часовъ, а B — сумму, уплачиваемую имъ за каждый квт.-часъ.

Несмотря на кажущуюся простоту, оказывается довольно трудно опредѣлить коэффициенты A и B . Нѣкоторыя компаніи опредѣляютъ, напримѣръ, коэффициентъ A по мощности лампочекъ у абонента, но это потребуетъ постоянного контроля, такъ какъ ничего не стоитъ измѣнить эту мощность такъ, чтобы пришлось платить меньше.

Болѣе логичнымъ для опредѣленія одновременной мощности было бы руководствоваться мощностью счетчика, поставленнаго у абонента, но это было бы также не вполне справедливо по отношенію, напримѣръ, къ абоненту, который 11 мѣсяцевъ въ году отсутствуетъ.

Самымъ справедливымъ является ступенчатый или дифференціальный тарифъ, который въ то же время болѣе понятенъ для публики; онъ состоитъ въ томъ, что если мощность приборовъ имѣющихся у потребителя есть P , то за первые NP квт.-часовъ онъ платитъ по B' за киловаттъ, а за дальнѣйшіе квт.-часы B'' , т. е. гораздо дешевле.

Комиссія опредѣляетъ величины A , B'' слѣдующимъ образомъ, разбивая полученную выше стоимость энергіи на двѣ части: первую, независящую отъ числа киловаттъ и переменную, зависящую и измѣняющуюся съ этимъ числомъ. Въ нѣкоторыхъ случаяхъ трудно уловить зависимость, напримѣръ, насколько персоналъ увеличивается съ увеличеніемъ расхода, и это дѣленіе оказывается, конечно, очень приблизительнымъ, но иного способа нѣтъ. Если принять, что загрузка станціи выражается 750 часами въ годъ, то стоимость cadaго квт.-часа разобьется слѣдующимъ образомъ:

$\frac{1}{4}$ постоян. и $\frac{3}{4}$ переменн. .	4,95 = 1,24 + 3,71
Сдѣльная плата	
$\frac{3}{4}$ постоян. и $\frac{1}{4}$ пропорц. .	4,33 = 3,24 + 1,09
Содерж. и общ. иедержки	
$\frac{1}{2}$ постоян. и $\frac{1}{2}$ пропорц. .	3,09 = 1,54 + 1,55
Расх. на адм. и ком. часть	
$\frac{3}{4}$ постоян. и $\frac{1}{4}$ переменн. .	3,09 = 2,32 + 0,77
	<hr/>
	32,86 = 21,74 + 11,14

Итакъ $A=21,74$ сантима на квт.-часъ
 $B=11,14$ " " "

Число 750 часовъ относится къ центральной станціи, между тѣмъ мощность лампъ и двигателей, а значитъ и счетчиковъ, присоединенныхъ къ станціи, обыкновенно въ 1,5—2 раза больше мощности станціи. Такъ какъ тарификація дѣлается по мощности счетчиковъ, то поэтому вмѣсто 750 ч. слѣдуетъ принять въ среднемъ использование или загрузку равной 400 часамъ, а слѣдовательно цѣна 1 киловатта для всѣхъ учреждений, у которыхъ использование аппаратовъ не достигаетъ 400 часовъ, будетъ

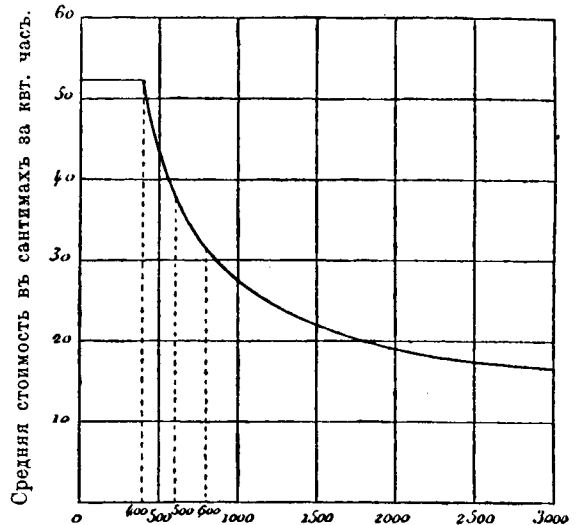
$$y = 22 \frac{750}{400} + 11 = 62,3 \text{ сантима за квт.-час.}$$

Если же использование u болѣе 400 ч., то тарифъ будетъ выражаться формулой

$$y = \frac{400 \cdot 62,3}{u} + (u - 400) 11 \dots \dots (2)$$

Изъ этой формулы видно, что при

$u=1000$ час. въ годъ	$y=27,5$ сант.
$u=2000$ " " "	$y=19$ "
$u=3000$ " " "	$y=16,5$ "



Продолжительность годового потребления, въ часахъ.
Стоимость электрической энергіи въ функціи потребления.

Фиг. 4.

Для большей наглядности, какъ понижается тарифъ при болѣе равномерности потребления, то есть при увеличеніи использования n , приводимъ кривую (фиг. 1), изображающую уравненіе (2).

Такого рода національный тарифъ и предложенъ комиссіей, какъ наиболее справедливый для потребителей и производителей.

Заканчивая свой докладъ, комиссія опредѣляетъ, что для осуществленія вышеописанныхъ работъ потребуются минимумъ 5—6 лѣтъ: одинъ годъ уйдетъ на подготовительныя работы, три года на постройку

	Всего въ сантимахъ.	Часть независим. отъ числа квт.	Часть пропорц.на ч. квт.
Проценты на капиталъ . . .	11,40 = 12,40		0
Амортизация машинъ			
$\frac{1}{4}$ постоян. и $\frac{2}{3}$ переменн. .	6 = 2 + 4		
Топливо			

*) См. Э—во 1904 г., № 9—10, стр. 141

и оборудованіе централей, устройство канализаци и т. д., и, наконецъ, минимумъ 2 года на приведение всего устройства въ нормальныя условия эксплуатаціи.

I. Троицкій.

БИБЛИОГРАФІЯ.

Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 6. **Elektromagnetische Schwingungen und Wellen**, von Dr. Josef Ritter von Geitler. Mit 86 eingedruckt. Abbildungen. Braunschweig. Druck und Verlag von Friedr. Vieweg und Sohn. 1905.

Наука. Выпускъ 6. **Электромагнитныя колебанія и волны**. И. Гейтлера. Изд. Фр. Фишера и С. Брауншвейгъ. 1905. Стр. 154 + VIII въ 8 л. Цѣна 4 мк. 50 пф.

Передъ нами 6 выпускъ серіи популярныхъ монографій по различнымъ отраслямъ физической науки. Ею темой является одинъ изъ наиболѣе современныхъ и интересныхъ вопросовъ, получившихъ особенную популярность въ послѣднее время благодаря примѣненію научныхъ результатовъ къ различнымъ техническимъ задачамъ. Но и самъ по себѣ этотъ отдѣлъ представляетъ въ современной наукѣ одно изъ самыхъ основныхъ приобрѣтеній ея, перевернувшихъ многія прежнія представленія на природу явленій. Ни для представителя науки, ни для техника электромагнитная теорія свѣта не представляетъ теперь новизны; она вошла въ кругъ обычныхъ идей и заняла нѣкъмъ не оспариваемое положеніе. Но въ популярныхъ изданіяхъ до сихъ поръ она фигурируетъ въ качествѣ новой теоріи, которая излагается въ концѣ, послѣ эфирной, механической теоріи свѣта, и какъ будто стоитъ еще подъ знакомъ вопроса. Такое отношеніе къ ней отчасти объясняется педагогическими (не всегда вѣрными) соображеніями, отчасти просто силой рутини. Поэтому всякую попытку сдѣлать въ этомъ отношеніи шагъ впередъ, популяризовать научное достояніе, нужно привѣтствовать, въ особенности, если она дѣлается такъ умѣло, какъ въ настоящемъ изданіи.

Книжка составлена въ духѣ всего изданія, т. е. стремится быть по возможности общедоступной. Это ставитъ для составителя, конечно, несомнѣмъ приятную задачу начать съ самыхъ элементарныхъ истинъ и пользоваться только общедоступнымъ способомъ изложенія, т. е. избѣгать употребленія математики. Еще Фарадей говорилъ, что „популярныя изданія не могутъ поучать въ полной мѣрѣ“, а по отношенію къ данной области это изрѣченіе особенно приложимо. Теорія электромагнитныхъ явленій выросла на математической почвѣ и не можетъ быть полно изложена безъ пользованія высшей математикой. Поэтому описательный, словесный способъ изложенія по необходимости долженъ страдать нѣкоторой неуклюжестью и многословіемъ. Правда, математическое изложеніе съ педагогической стороны обладаетъ также нѣкоторыми недостатками, подчасъ скрывая подъ изящной формулой физической смыслъ явленія, но все-таки многое въ теоріи остается недоступно популярному изложенію. Къ счастью, въ данныхъ вопросахъ на помощь могутъ быть привлечены аналогіи изъ другихъ областей, какъ-то механики, оптики, акустики, которыя болѣе доступны и привычны для начинающаго и даютъ картинныя иллюстраціи къ теоретическимъ результатамъ. При изложеніи электромагнитной теоріи свѣта такія аналогіи особенно полезны и поучительны, и ими авторъ до нѣкоторой степени воспользовался. Кромѣ того, богатство экспериментальнаго матеріала, накопленнаго въ послѣднее время, настолько велико, что

изложеніе его представляетъ весьма интересную и благодарную задачу.

Изложеніе нельзя назвать историческимъ, какъ это дѣлаетъ издатель. Правда матеріалъ группируется около нѣсколькихъ великихъ именъ, а именно Фарадея, Максвелля и Герца, но работы этихъ физиковъ служатъ лишь исходнымъ пунктомъ, отъ котораго ведется изложеніе; вообще же изложеніе носитъ систематической характеръ. Послѣ нѣсколькихъ общихъ замѣчаній о теоріи дѣйствія на разстояніи, авторъ переходитъ къ изложенію элементарной теоріи электромагнитнаго поля, поставивъ во главѣ этого отдѣла имя Фарадея. Здѣсь вводятся понятія о магнитномъ и электрическомъ полѣ въ духѣ теоріи дѣйствія черезъ среду, о токахъ въ провооникахъ и диэлектрикахъ, объ электромагнитныхъ явленіяхъ и электрическихъ колебаніяхъ. Къ этому отдѣлу въ особенности примѣнными высказанныя выше замѣчанія о недостаткахъ популярнаго изложенія. Въ слѣдующемъ отдѣлѣ, связанномъ съ именемъ Максвелля, излагаются основанія электромагнитной теоріи свѣта. Иллюстраціей этой послѣдней можно считать все содержаніе третьяго отдѣла, въ которомъ излагаются классическіе опыты Герца. Наконецъ, въ заключеніе сведены во едино всѣ новѣйшія работы, относящіяся къ темѣ книжки. Несмотря на обиліе интереснаго матеріала, этотъ послѣдній отдѣлъ грѣшитъ однимъ существеннымъ недостаткомъ, слыхомъ большой сжатостью и конспективностью изложенія. Авторъ, повидимому, стремился использовать весь матеріалъ въ предѣлахъ небольшой главы, и безъ нужды загромождалъ ее обильными ссылками на источники. Поэтому во многихъ мѣстахъ онъ ограничивается лишь однѣми ссылками. Намъ кажется, что при томъ популярномъ характерѣ, который носитъ вся монографія, стремленіе къ полнотѣ и исчерпывающему изложенію совершенно ненужно, и полезнѣе было бы остановиться лишь на самомъ существенномъ.

Въ похвалу книгѣ можно сказать еще, что въ ней использованы работы самаго послѣдняго времени, и изложеніе предмета носитъ поэтому характеръ свѣжести и современности.

Д. Р.

НОВЫЯ ИЗДАНИЯ.

Sammlung elektrotechnischer Vorträge. B. VI. **Spannungserhöhung in elektrischen Netzen infolge Resonanz und freier elektrischer Schwingungen** von G. P. Markovitch, Mit 17 Abbildungen. 66 стр. въ 8 д. л. Ц. М. 1.20.

Die elektrischen Druckknopfsteuerungen für Aufzüge, von A. Genzmer. Mit 180 Abbild. im Text. Hannover. Verlag von Gebrüder Jänecke. 1905. Preis M. 5. 166 стр. въ 8 д. л.

Die Wissenschaft. Sammlung naturwissensch. und mathemat. Monographien, Heft 7. **Die neuere Entwicklung der Kristallographie**, von Dr. H. Baumhauer. Mit 46 eingedr. Abbildungen. Braunschweig. Druck und Verlag von Fr. Vieweg und Sohn. 1905. 183 стр. въ 8 д. л.

Monographien über angewandte Electrochemie. Herausgegeben von Victor Engelhardt. Halle-a-s. Wilhelm Knapp. XVIII Band. **Elektrolytische Verzinkung**, von Sher. Cowper Coles, London. Ins Deutsche übertragen von Dr. Emil Abel. Mit 36 figuren und 9 Tabel. im Text. 37 стр. въ 8 д. л. Ц. М. 2 (=1 рб.). XIX Band. **Die elektrolytische Chloratindustrie**, von John B. C. Kershaw. Ins Deutsche übertragen von Dr. M. Huth. Mit 39 Figur. und 3 Tabellen im Text und einem Anhang. Ц. М. 6 (=3 рб.). 123 стр. въ 8 д. л.