

Лекционные материалы

Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети»

Разработаны доцентом кафедры «Электроэнергетические системы»
ВятГУ Вычегжаниным А.В.

Введение

- Цели и задачи расчетов установившихся режимов
- Классификация сетей по методам расчетов

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

- **Режим системы** – совокупность процессов, происходящих в энергосистеме в данный момент времени или на каком-то интервале. Таким образом, режим системы определяет ее состояние. Соответствующий термин применим и к сети.
- **Параметрами режима** являются: перетоки мощности по участкам, напряжения в узловых точках, частота, угол сдвига между векторами ЭДС и напряжениями и т.д. Они тесно связаны с параметрами системы (сети).
- **Параметрами системы (сети)** являются полные, активные и реактивные сопротивления, взаимные проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени агрегатов и т.д.

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

- **Общей задачей** расчета режимов работы электрических сетей является определение напряжений, потоков активной и реактивной мощности и потерь в ее звеньях.
- При расчетах рабочих режимов все элементы сети представляются **схемами замещения** с соответствующими параметрами.
- Электрическую сеть изображают в виде условной однолинейной схемы, т.е. предполагают, что рабочий режим является **симметричным и синусоидальным**.

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

Электрические расчеты выполняют для следующих установившихся режимов:

- **нормальный режим наибольших нагрузок;**
- **нормальный режим наименьших нагрузок;**
- **послеаварийные режимы, в которых в результате аварии отключен тот или иной элемент сети;**
- **иногда требуется проведение расчетов для ремонтных режимов.**

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

Результаты электрических расчетов могут использоваться для решения целого ряда частных задач, среди которых можно отметить:

- **выбор необходимых средств регулирования напряжения;**
- **анализ величины потерь мощности и электроэнергии в элементах сети;**
- **выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии и мощности и др.**

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

Из сказанного выше, следует, что при электрических расчетах необходимо определить:

- **величины перетоков мощности или токов на отдельных участках сети**, для оценки их допустимости с точки зрения нагрева токоведущих частей элементов сети таких, как провода воздушных линий, жилы кабелей и т.д.;
- **значения напряжений во всех узлах сети**, для анализа возможности существования такого режима с точки зрения устойчивости системы и возможности работы потребителей с полученными уровнями напряжений.

Цели и задачи расчетов установившихся режимов

Исходными данными для проведения таких расчетов являются:

- **схема электрической сети;**
- **параметры схем замещения элементов сети (сопротивления и проводимости);**
- **параметры нагрузок и источников питания (токи или мощности);**
- **величины и фазы напряжений в характерных узлах, определяющих режим.**

Классификация методов расчета:

- В настоящее время существует **значительное количество различных методов расчета**. Каждый из них обладает соответствующими достоинствами и недостатками и имеет определенную область применения.
- Правильный выбор целесообразного метода расчета является весьма важным моментом, т.к. при этом может быть существенно сокращен объем вычислений.
- Различают **замкнутые и разомкнутые сети**, при расчетах которых необходимо учитывать некоторые особенности.
- Особенности расчетов замкнутых сетей рассматриваются в отдельном разделе

Классификация сетей по методам расчета:

Как отмечалось выше, все линии электропередачи по методам расчета можно разделить на **3 группы**:

- ✓ **Дальние ЛЭП** $U_{НОМ} \geq 330 \text{ кВ}$ с протяженностью $l \geq 500 \text{ км}$ и передаваемой мощностью $S \geq 500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.
- ✓ **Районные ЛЭП** $U_{НОМ} \geq 35 \text{ кВ}$ и передаваемой мощностью $S \geq 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.
- ✓ **Местные ЛЭП** $U_{НОМ} \leq 10 \text{ кВ}$.

Для каждой группы характерны вполне определенные особенности, как при составлении схем замещения, так и в степени детализации параметров режима.

Классификация сетей по методам расчета:

Различаются эти группы и по задачам, которые ставятся перед расчетчиками.

Для **первой группы**, например, необходимо учитывать распределенность параметров вдоль линии, должны учитываться волновые процессы и т.д.

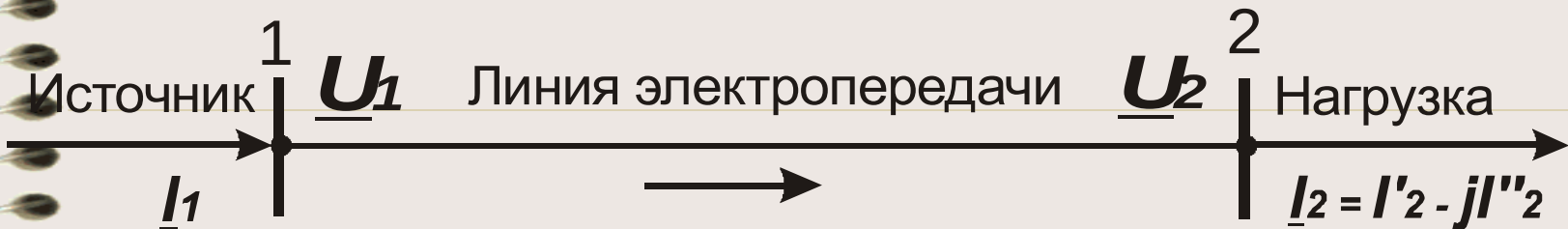
Для **третьей группы** можно ввести довольно большое количество упрощений, не оказывающих существенного влияния на результаты расчетов.

Проиллюстрировать физические процессы, происходящие в линиях, без лишней их детализации целесообразно на примере рассмотрения методик расчета линий, относящихся ко **второй группе**, т.е. на примере **районных ЛЭП**.

Расчет линии по току нагрузки

- Исходные данные
- Построение векторной диаграммы ЛЭП
- Падение, потеря и отклонение напряжения

Исходная информация:



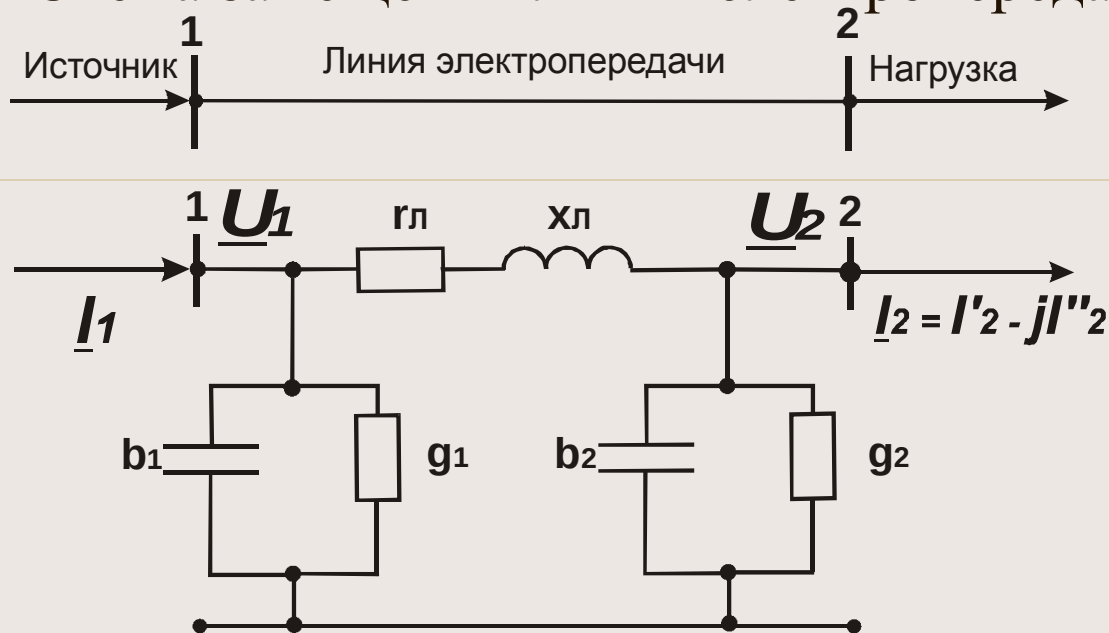
Известно также:

- погонные параметры линии - r_0 ; x_0 ; g_0 ; b_0 ;
- длина линии - L ;
- ток нагрузки - $\underline{I}_2 = I'_2 - jI''_2$;
- напряжение на шинах приемной подстанции в точке 2 - $\underline{U}_2$.

Требуется определить:

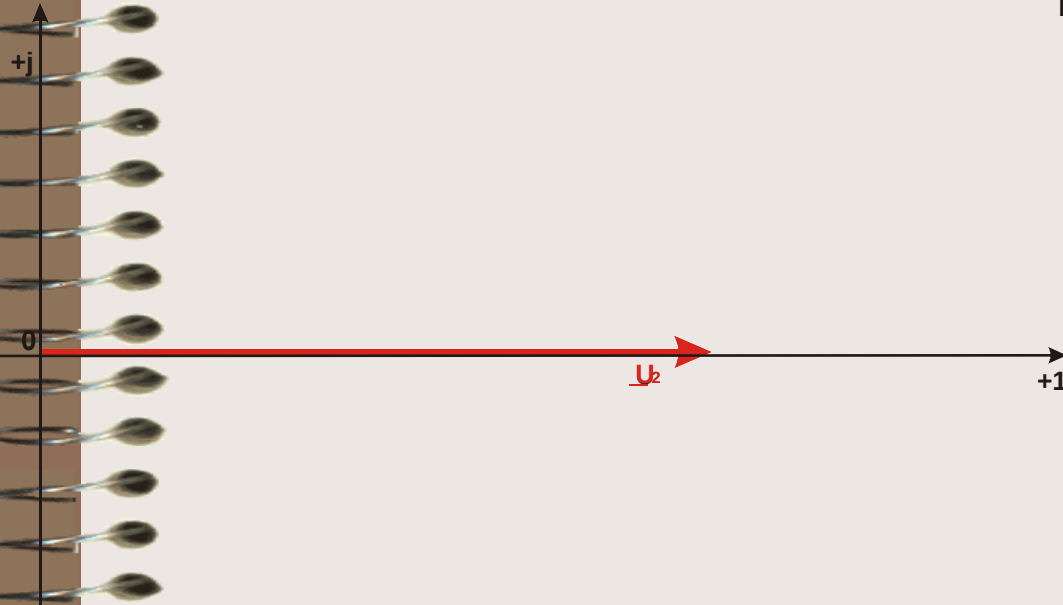
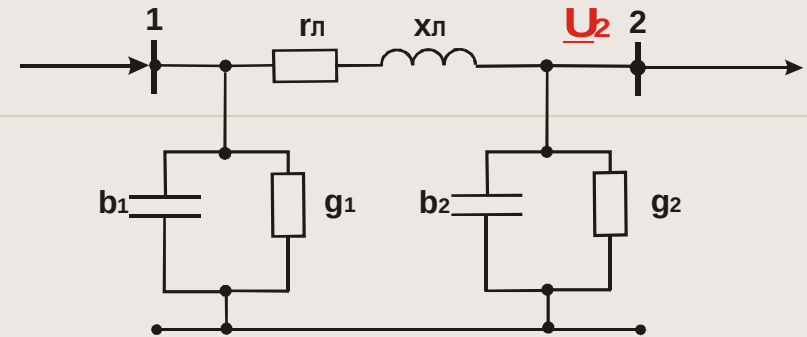
- напряжение в точке 1 (начало линии) - $\underline{U}_1$;
- ток, потребляемый схемой от источника - $\underline{I}_1$;
- угол между векторами $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$.

Схема замещения линии электропередачи:



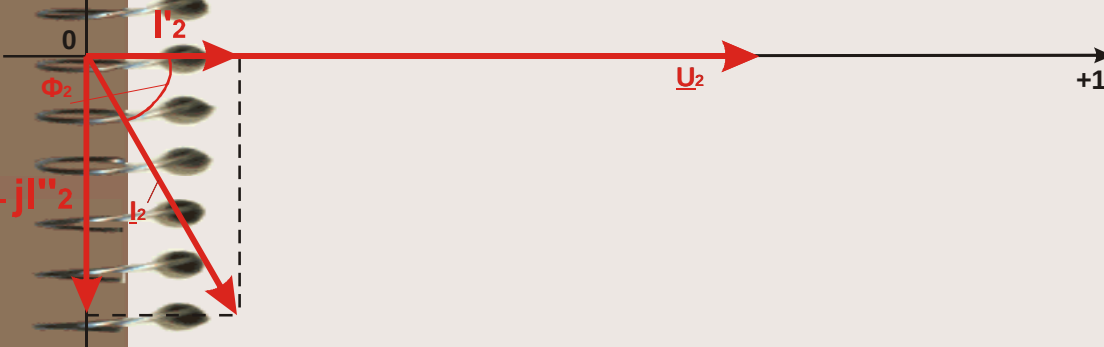
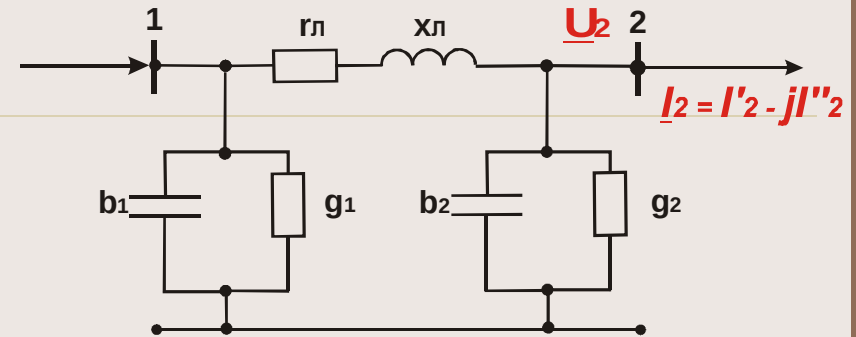
- $r_{\text{л}}$ — активное сопротивление линии
- $x_{\text{л}}$ — реактивное сопротивление линии
- g_1 и b_1 — активная и реактивная проводимости половины длины линии, отнесенные к ее началу
- g_2 и b_2 — активная и реактивная проводимости половины длины линии, отнесенные к ее концу

На комплексной координатной плоскости откладывают вектор фазного напряжения в конце линии $\underline{U}_{2\phi}$



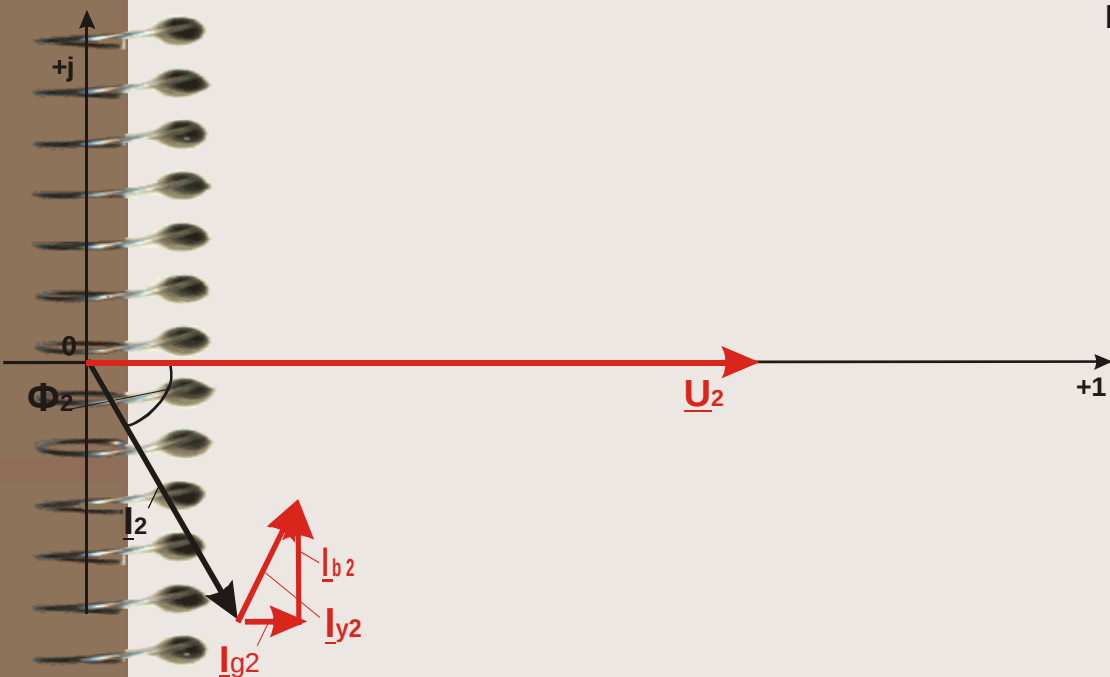
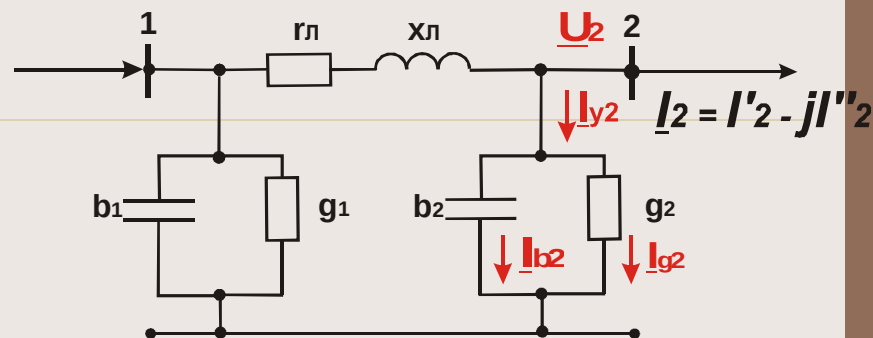
- Вектор фазного напряжения в конце линии $\underline{U}_{2\phi}$ считают совпадающим с положительным направлением оси действительных чисел.

Вектор тока нагрузки $\underline{I}_2$ отстает от вектора фазного напряжения $\underline{U}_{2\phi}$ на угол Φ_2



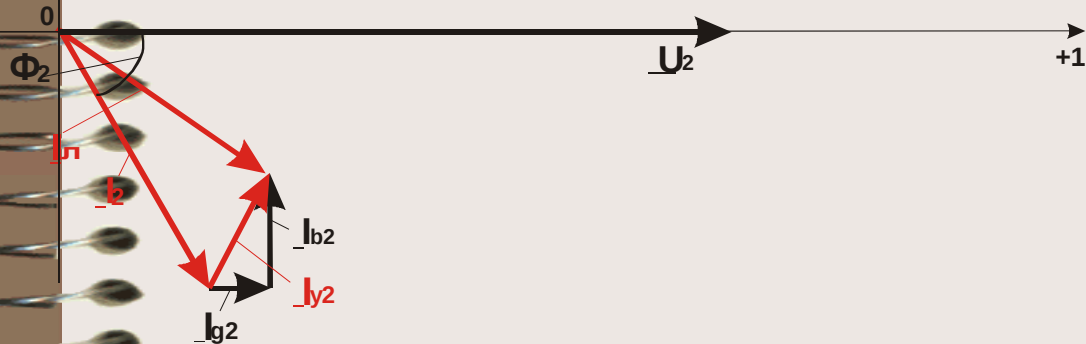
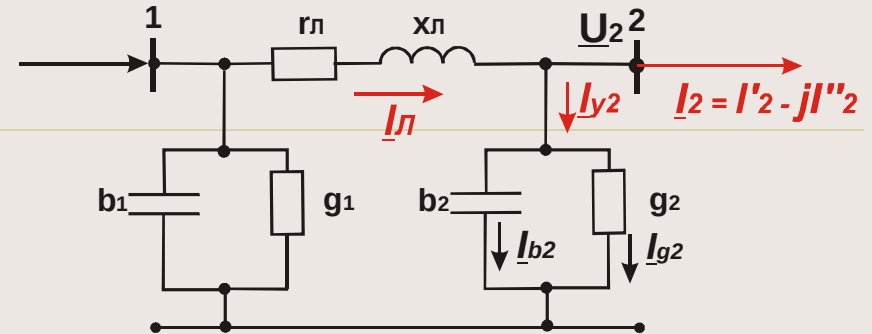
- I'_2 – активная составляющая тока нагрузки;
- $-jI''_2$ – реактивная (индуктивная) составляющая тока нагрузки.

Вектор тока через проводимости конца линии $\underline{I}_{y2}$ состоит из токов $\underline{I}_{g2}$ и $\underline{I}_{b2}$, протекающих под воздействием напряжения $\underline{U}_{2\phi}$



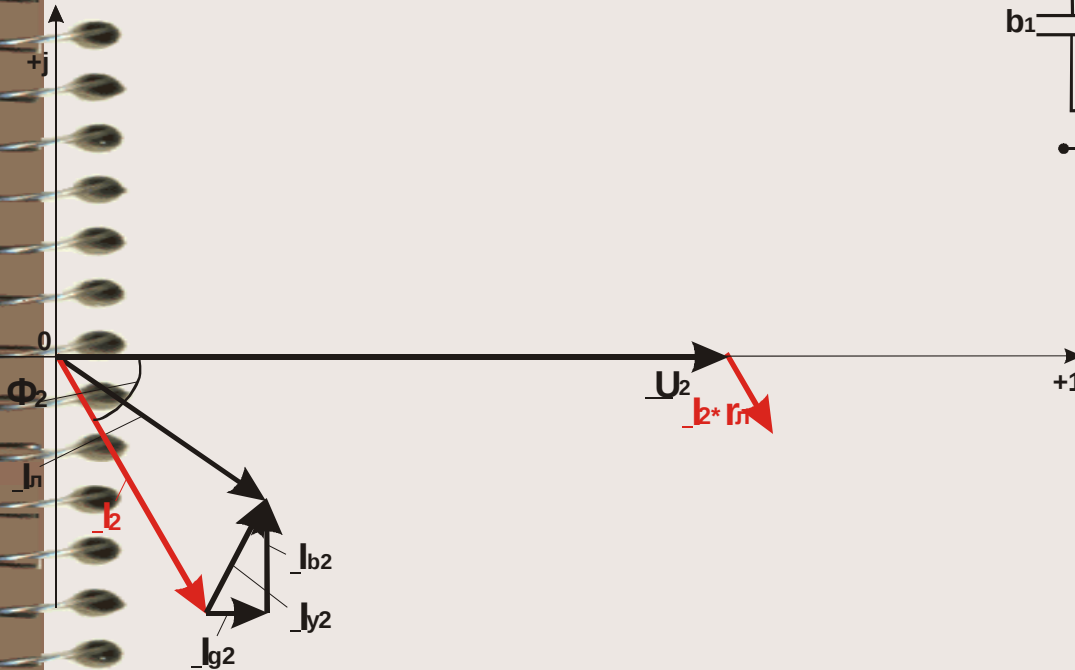
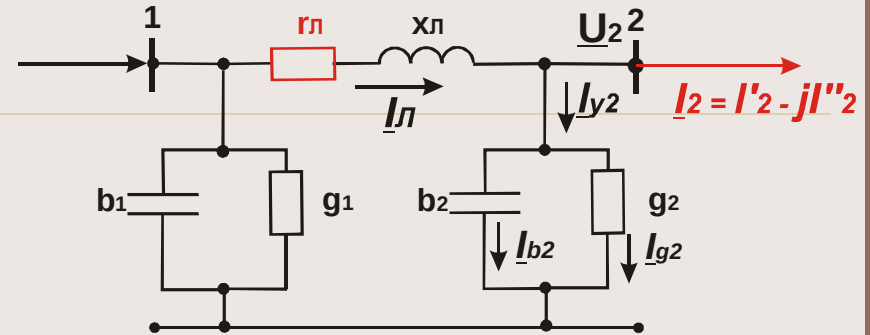
- $\underline{I}_{y2} = \underline{I}_{g2} + j\underline{I}_{b2}$
- Вектор $\underline{I}_{g2}$ совпадает с направлением вектора $\underline{U}_{2\phi}$, а вектор $\underline{I}_{b2}$ опережает вектор напряжения $\underline{U}_{2\phi}$.

Вектор тока линии $\underline{I}_\pi$ является геометрической суммой токов $\underline{I}_{y2}$ и $\underline{I}_2$, согласно первому закону Кирхгофа для узла 2.



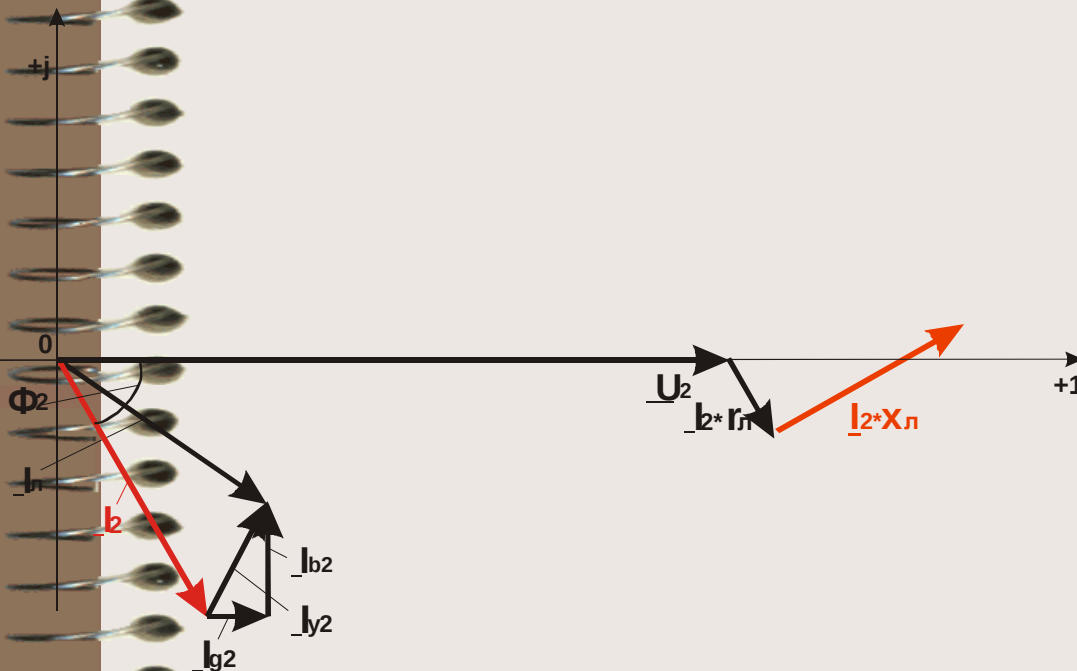
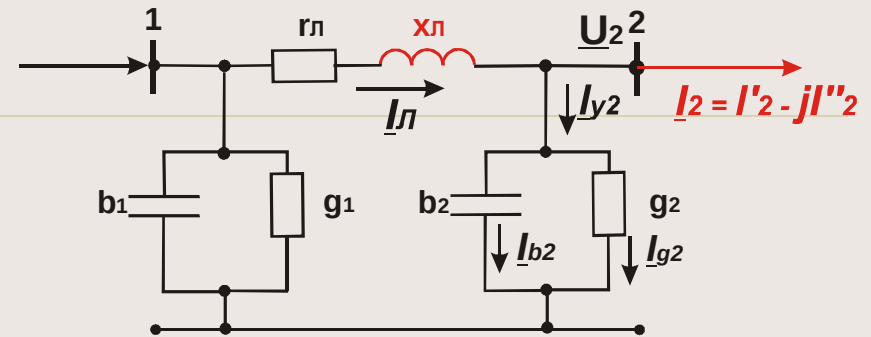
$$\underline{I}_\pi = \underline{I}_{y2} + \underline{I}_2 = (I_{g2} + I'_2) + j(I_{b2} - I''_2)$$

Вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии $r_{\text{л}}$ от протекания по нему тока $\underline{I}_2$, входящего в состав тока $\underline{I}_{\text{л}}$.



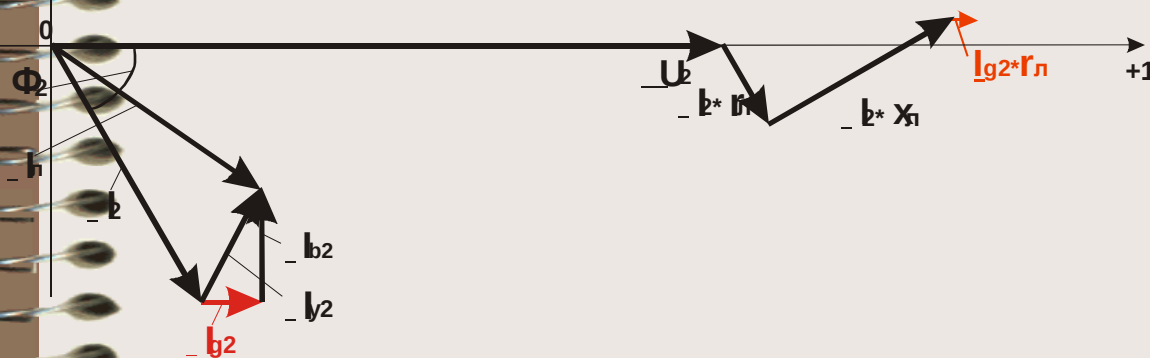
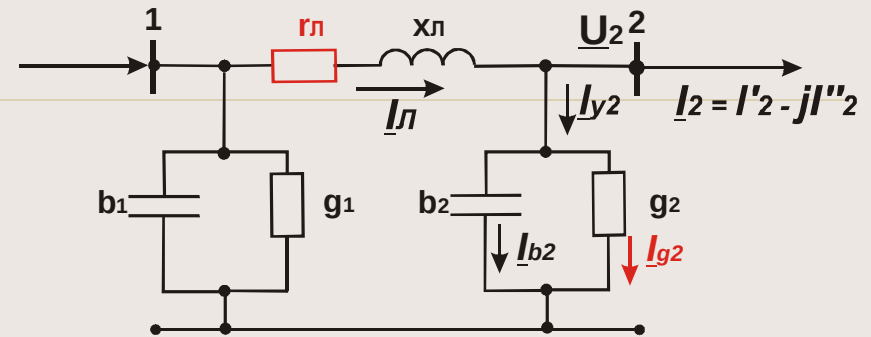
Вектор $\underline{I}_2 * r_{\text{л}}$ строится из конца вектора $\underline{U}_{2\phi}$ и совпадает по направлению с вектором тока $\underline{I}_2$.

Вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении линии X_L от протекания по нему тока $\underline{I}_2$, входящего в состав тока $\underline{I}_L$.



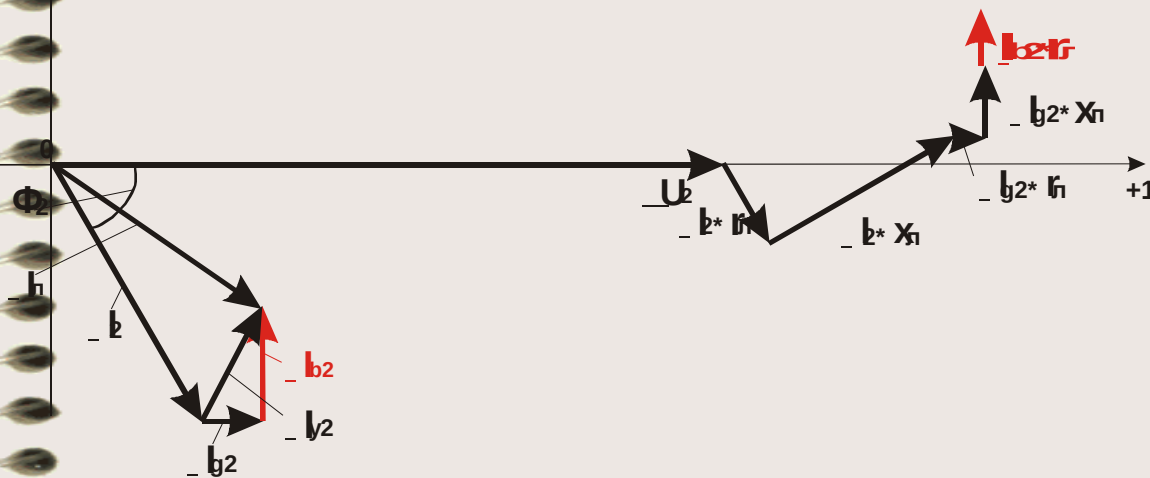
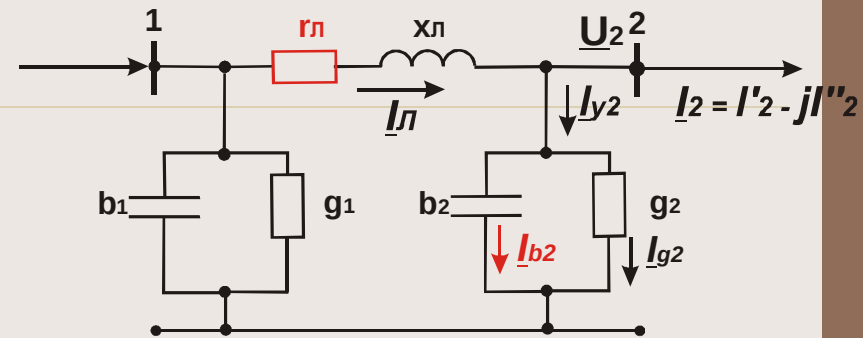
Вектор $\underline{I}_2 * X_L$ строится из конца вектора $\underline{I}_2 * r_L$ и опережает вектор тока $\underline{I}_2$ на 90 градусов.

Вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии r_{π} от протекания по нему тока $\underline{I}_{q2}$, входящего в состав тока $\underline{I}_{\pi}$.



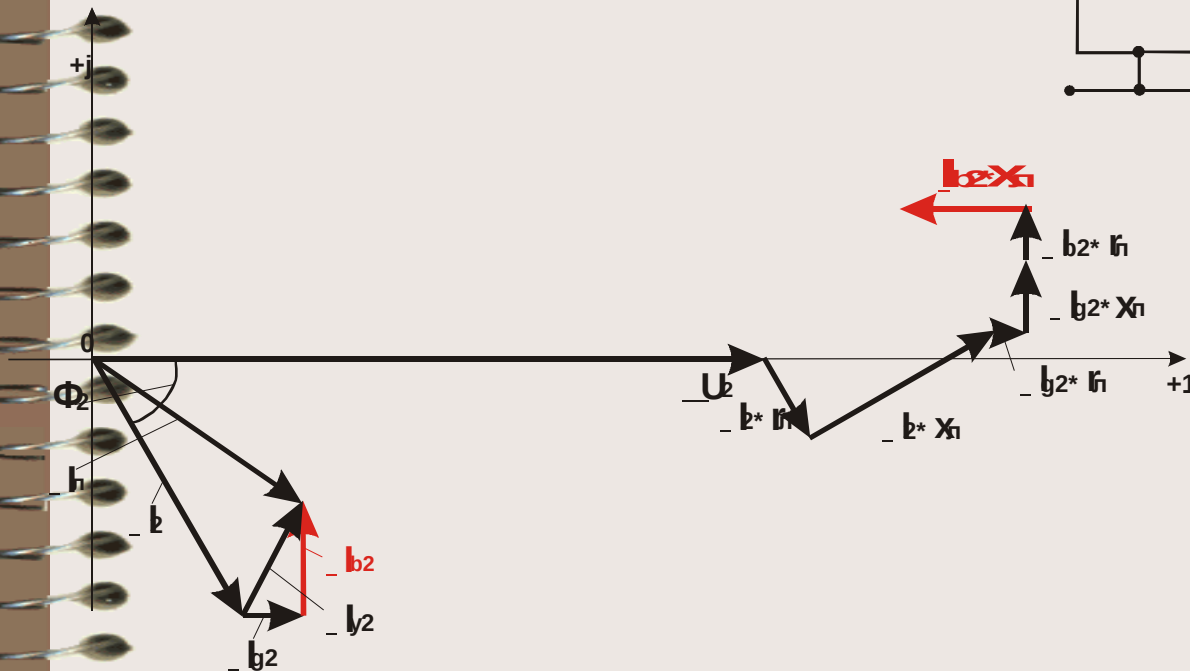
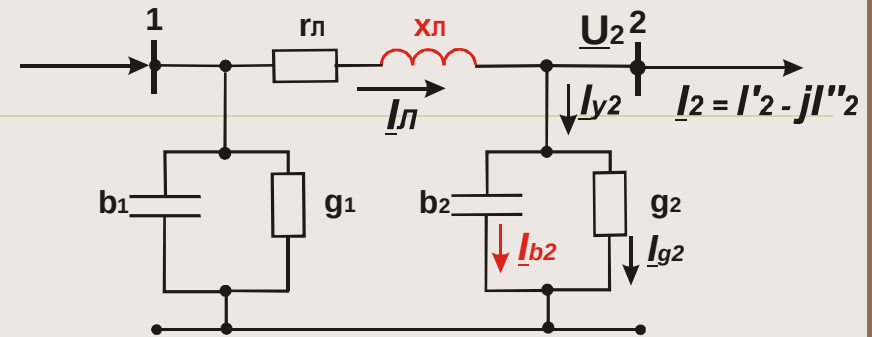
Вектор $\underline{I}_{q2} * r_{\pi}$ строится из конца вектора $\underline{I}_2 * X_{\pi}$ и совпадает по направлению с вектором тока $\underline{I}_{q2}$.

Вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии r_l от протекания по нему тока $\underline{I}_{b2}$, входящего в состав тока $\underline{I}_L$.



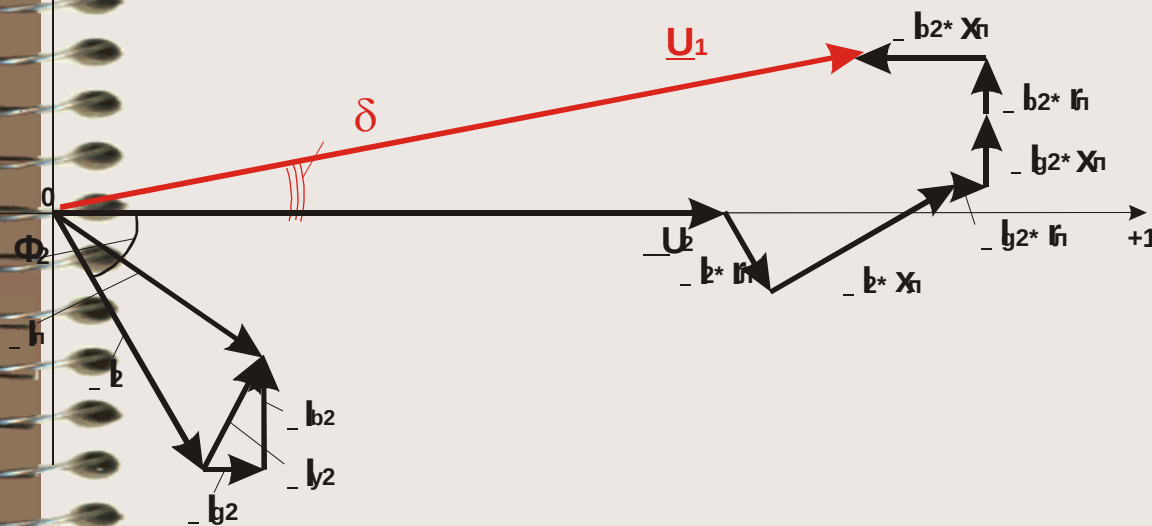
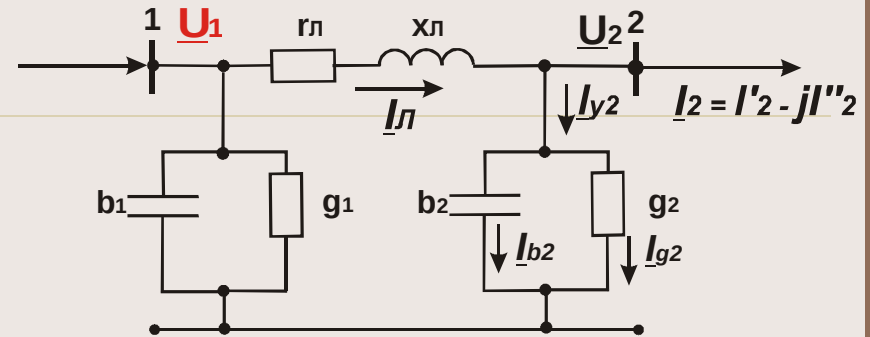
Вектор $\underline{I}_{b2} * r_l$ строится из конца вектора $\underline{I}_{g2} * X_l$ и совпадает по направлению с вектором тока $\underline{I}_{b2}$.

Вектор падения напряжения в реактивном сопротивлении линии $X_{\text{л}}$ от протекания по нему тока $\underline{I}_{b2}$, входящего в состав тока $\underline{I}_{\text{л}}$.



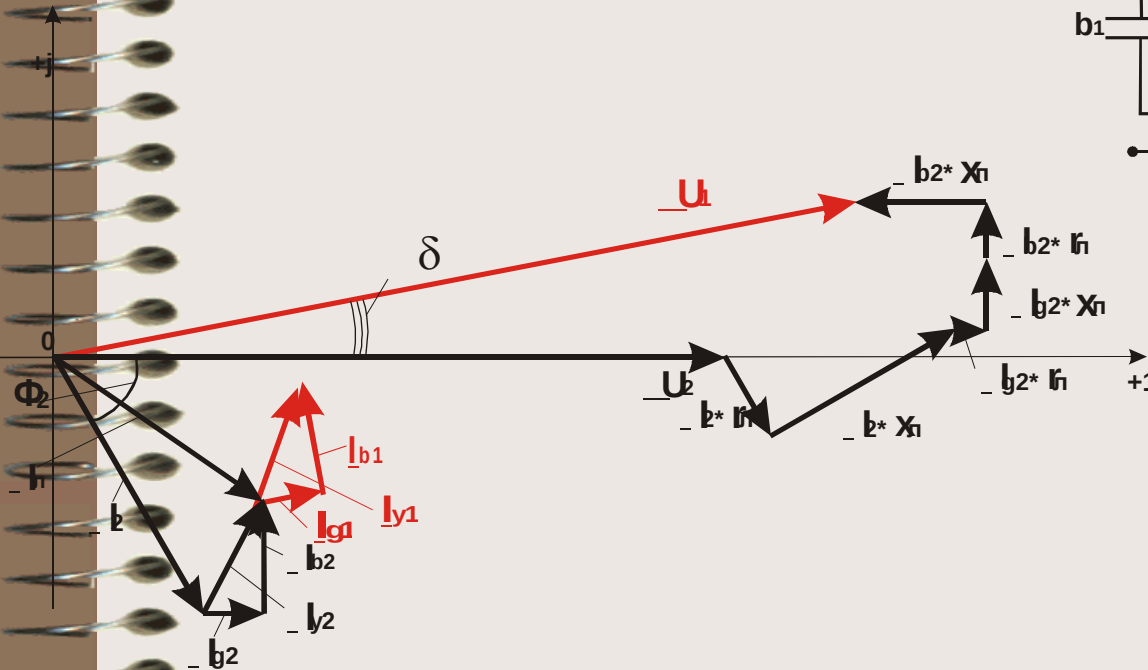
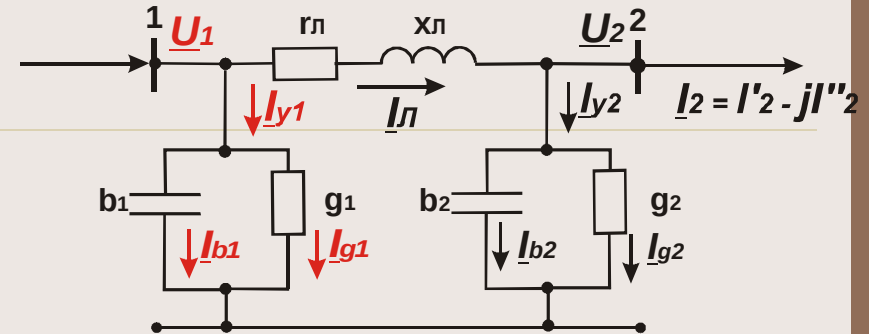
Вектор $\underline{I}_{b2} * X_{\text{л}}$ строится из конца вектора $\underline{I}_{b2} * r_{\text{л}}$ и опережает вектор тока $\underline{I}_{b2}$ на 90 градусов.

Из начала координат строится вектор фазного напряжения в начале линии (точка 1) $\underline{U}_{1\phi}$.



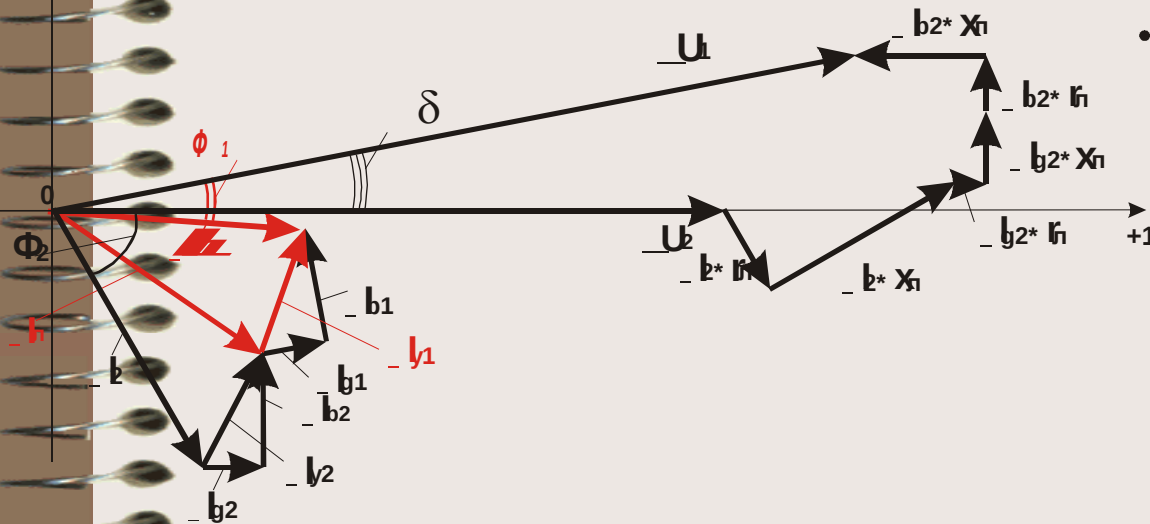
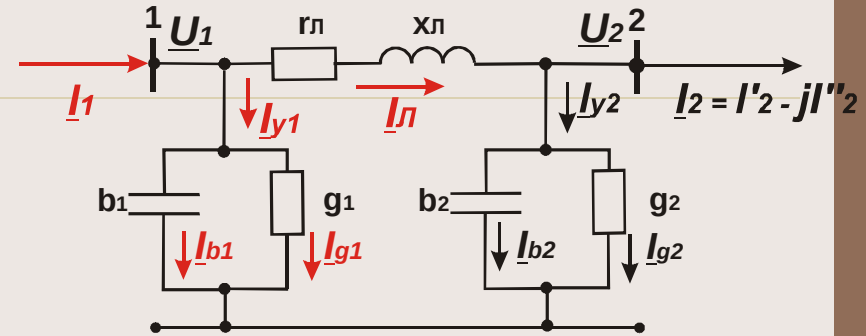
Определяют угол между векторами $\underline{U}_{1\phi}$ и $\underline{U}_{2\phi}$.

Вектор тока через проводимости начала линии $\underline{I}_{y1}$ состоит из токов $\underline{I}_{g1}$ и $\underline{I}_{b1}$, протекающих под воздействием напряжения $\underline{U}_{1\phi}$



- $\underline{I}_{y1} = \underline{I}_{g1} + j\underline{I}_{b1}$
- Вектор $\underline{I}_{g1}$ совпадает с направлением вектора $\underline{U}_{1\phi}$, а вектор $\underline{I}_{b1}$ опережает вектор напряжения $\underline{U}_{1\phi}$.

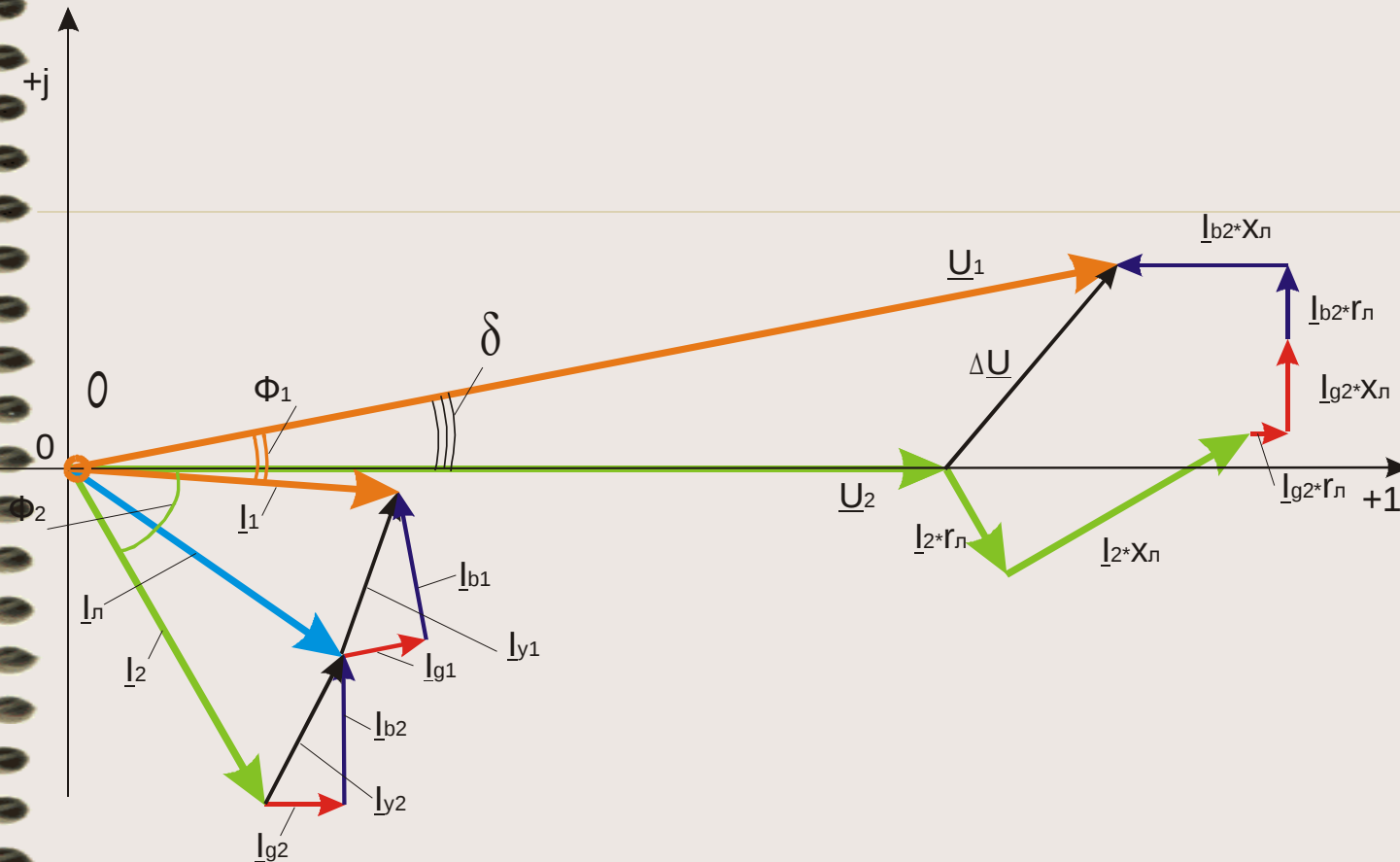
Вектор тока, потребляемого линией от источника $\underline{I}_1$ является геометрической суммой токов $\underline{I}_{y1}$ и $\underline{I}_L$, согласно первому закону Кирхгофа для узла 1.



$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{y1} + \underline{I}_L$$

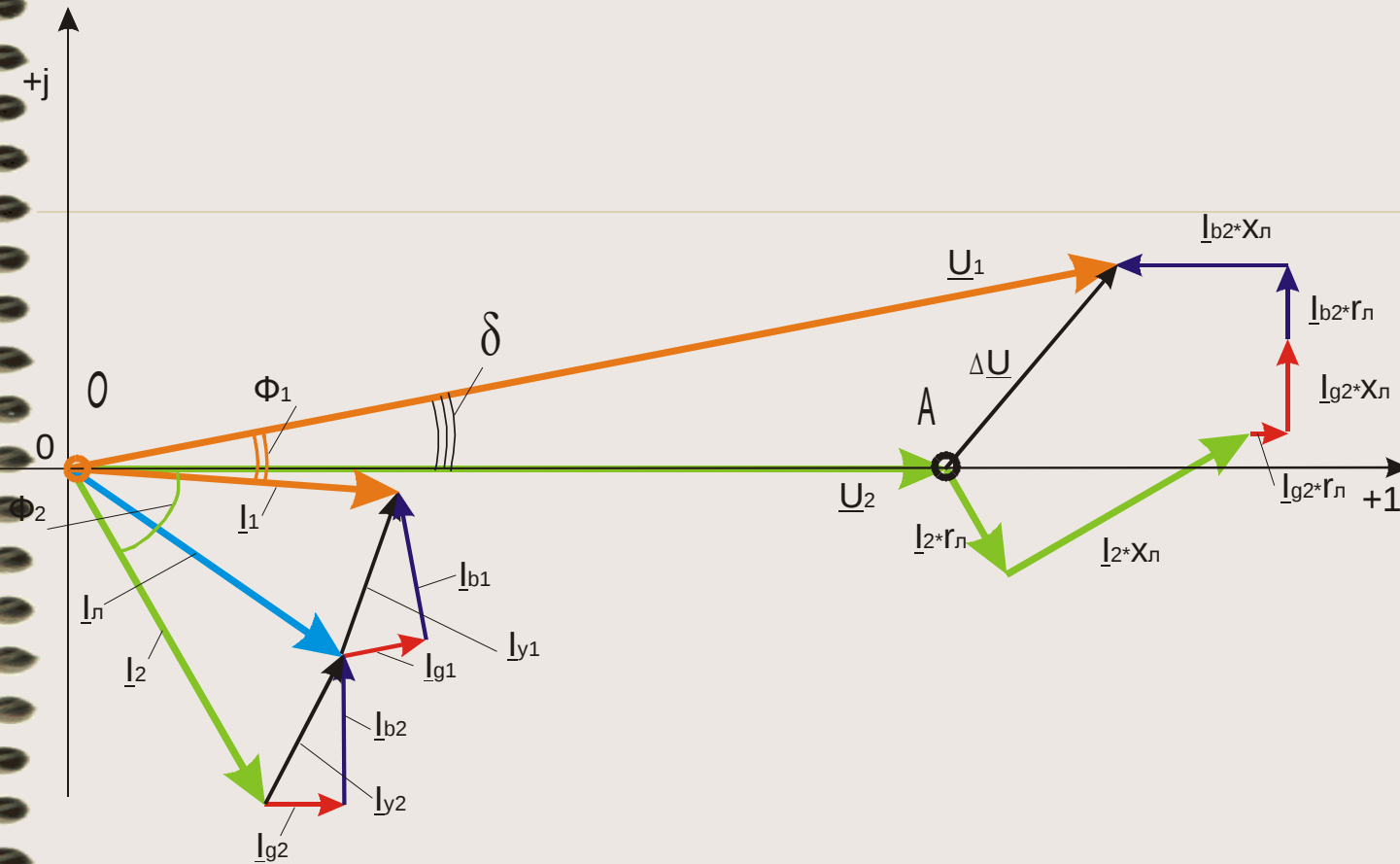
Угол Φ_1 - между векторами $\underline{U}_{1\phi}$ и $\underline{I}_1$.

Падение напряжения и потеря напряжения



Точка « O » - соответствует началу координат комплексной плоскости.

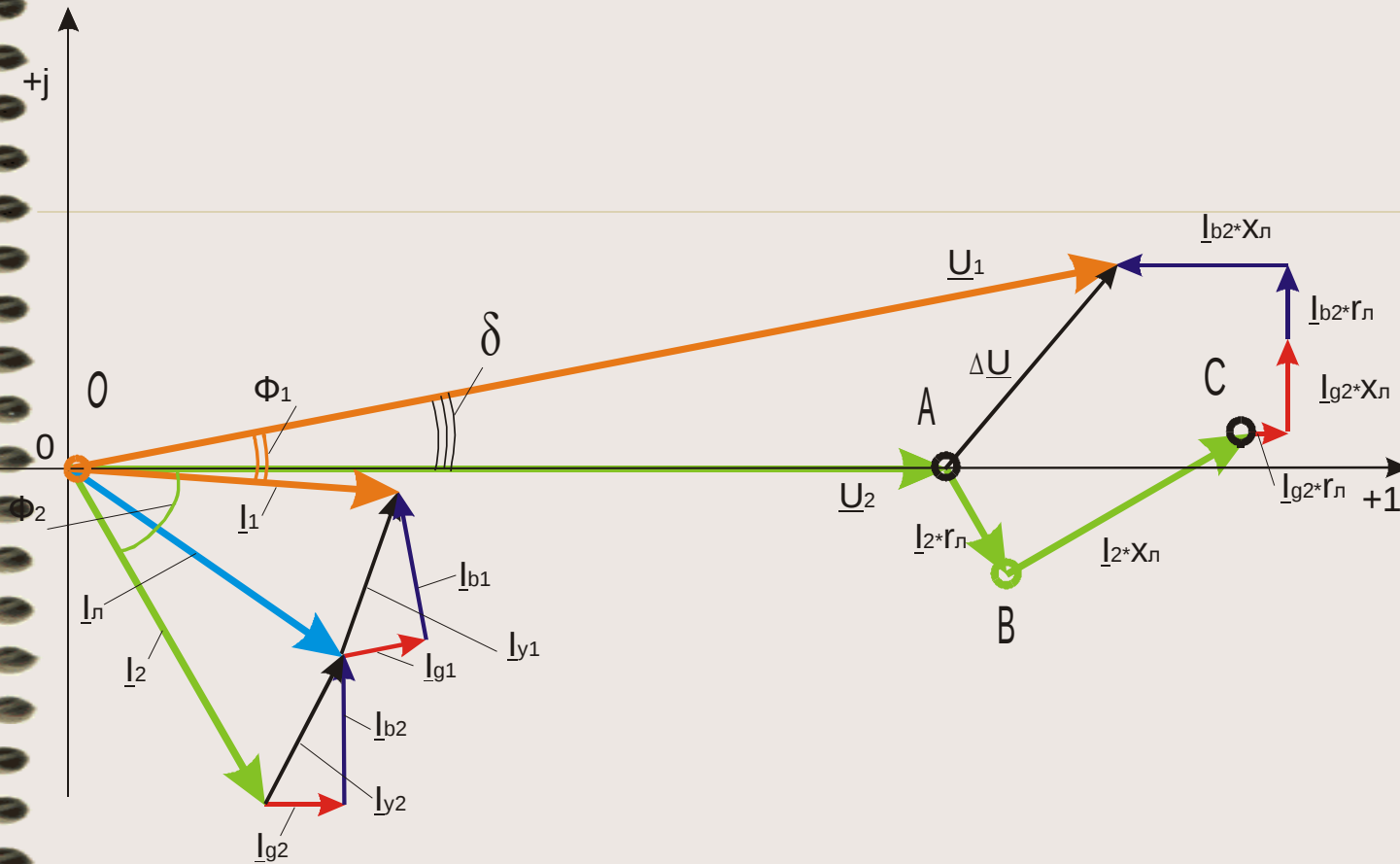
Падение напряжения и потеря напряжения



Точка «А» - соответствует концу вектора $\underline{U}_{2\phi}$.

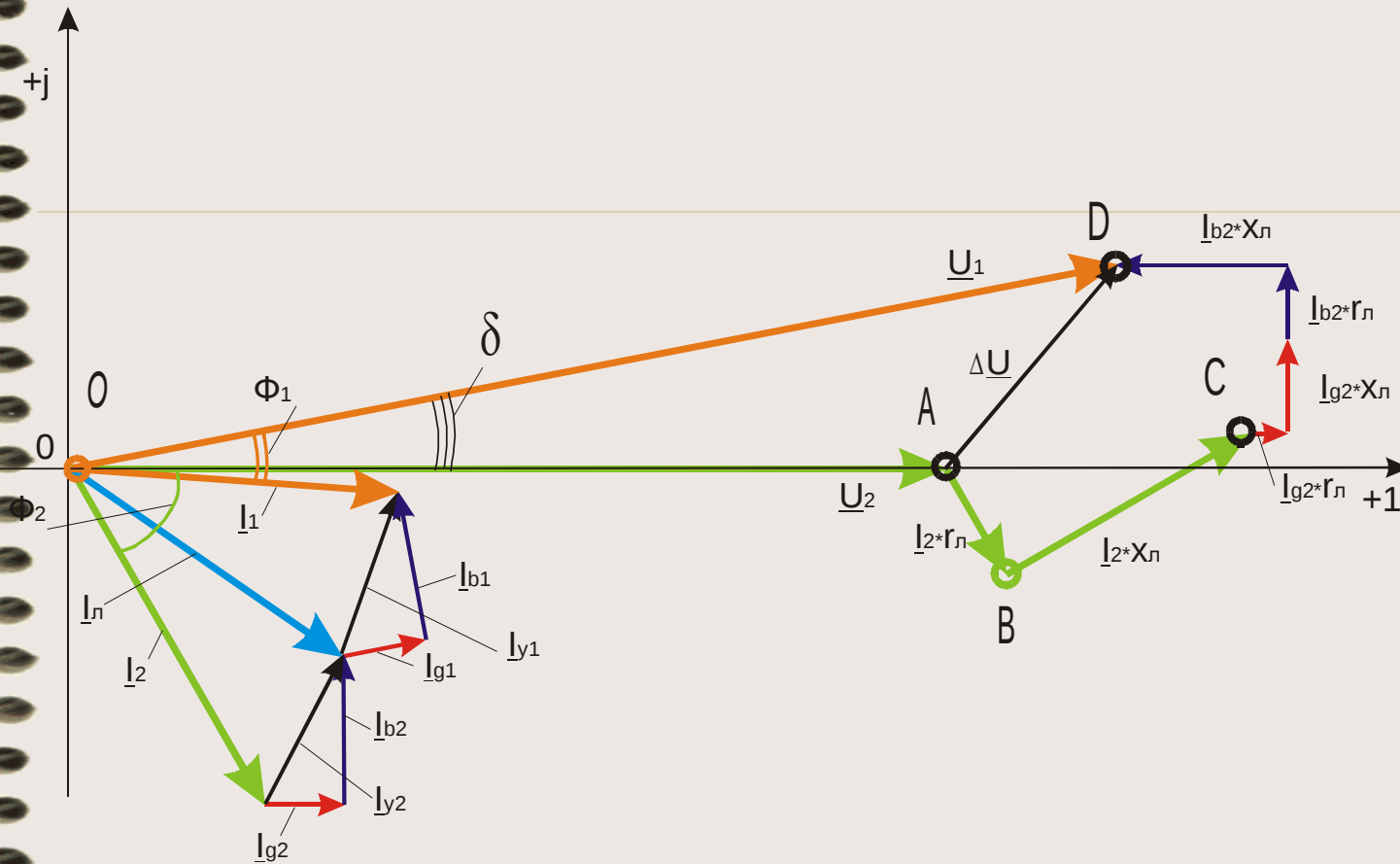


Падение напряжения и потеря напряжения



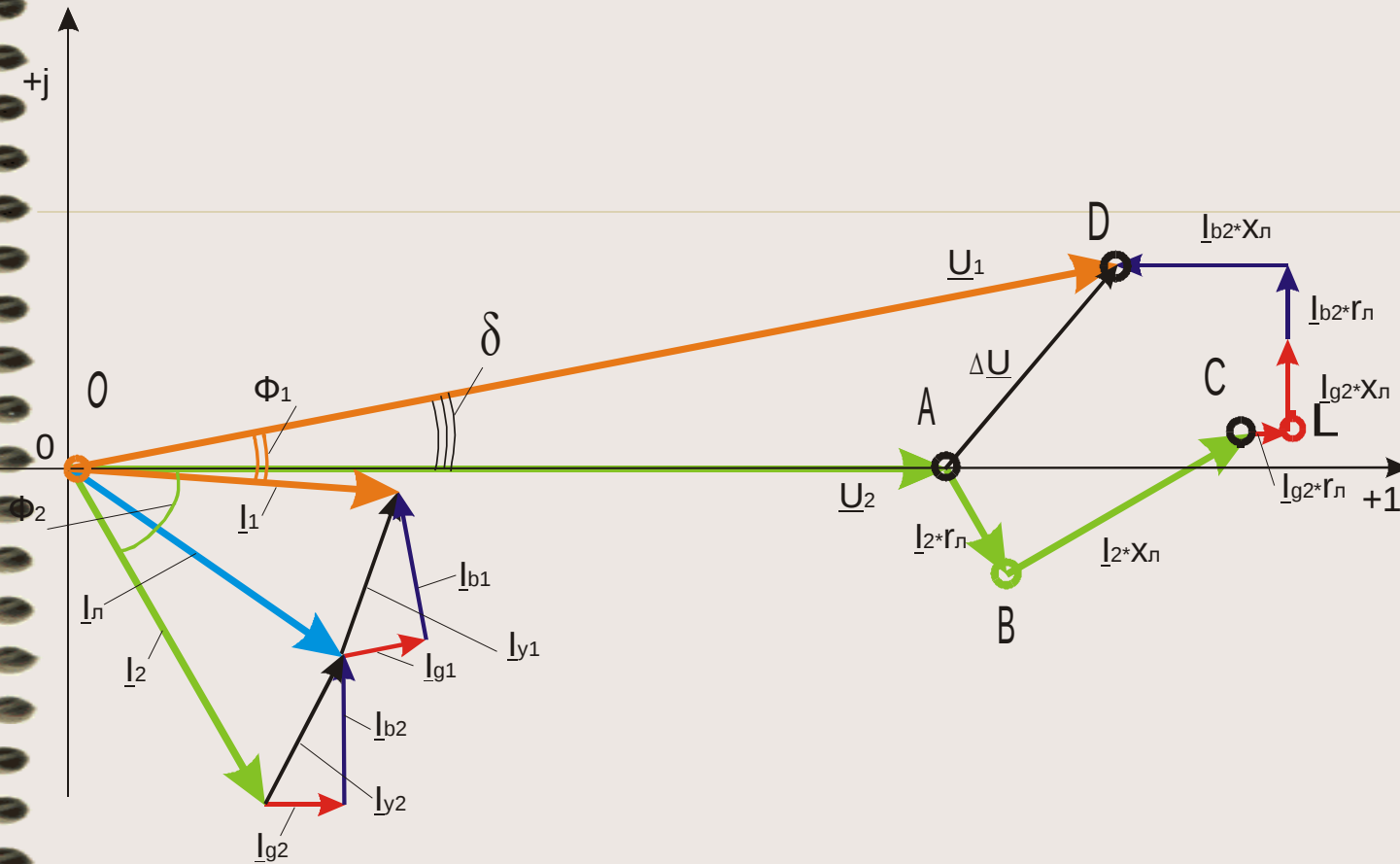
Точка «С» - соответствует концу вектора $\underline{I}_2 * \underline{X}_L$.

Падение напряжения и потеря напряжения



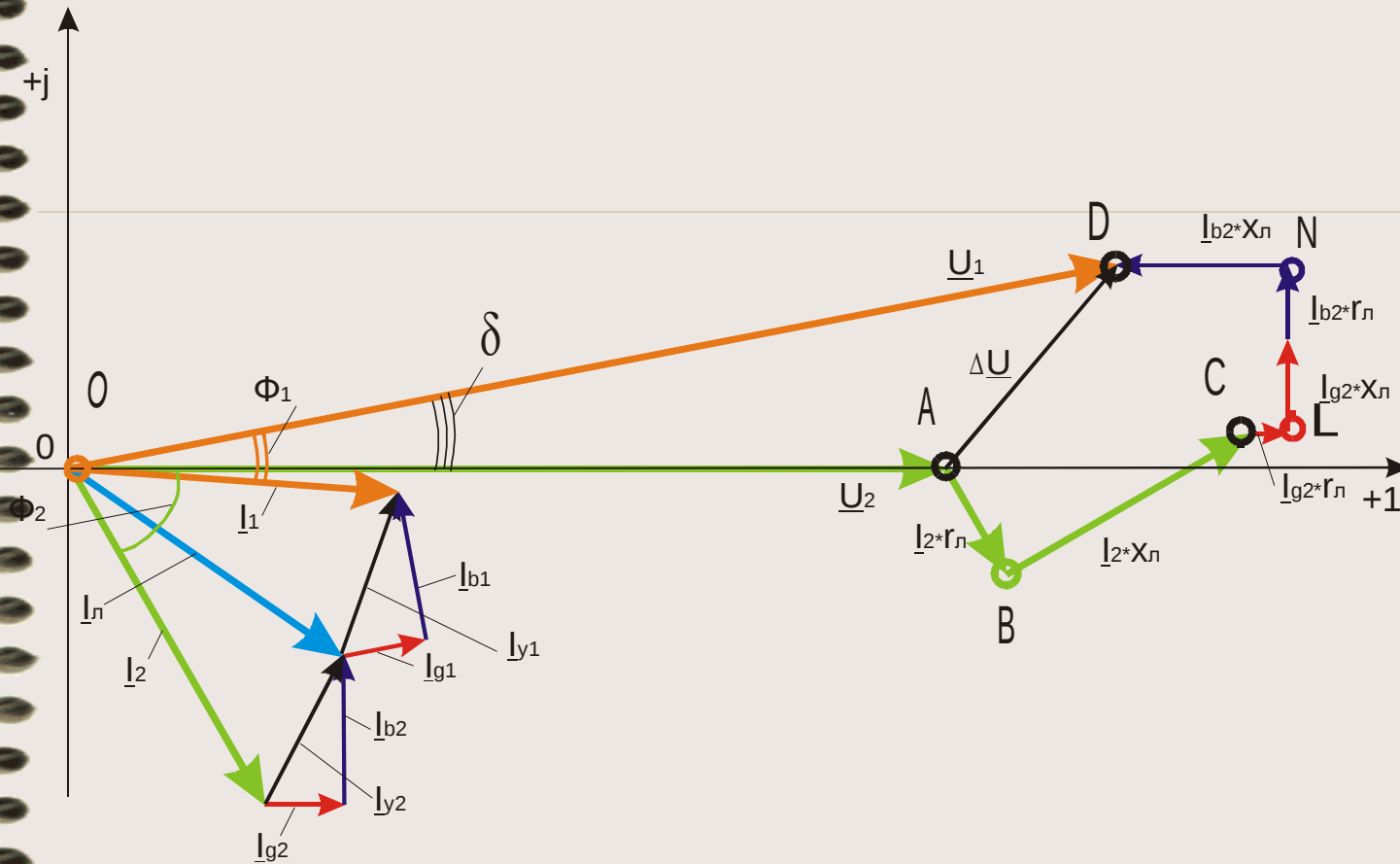
Точка «D» - соответствует концу вектора $\underline{U}_{1\phi}$.

Падение напряжения и потеря напряжения



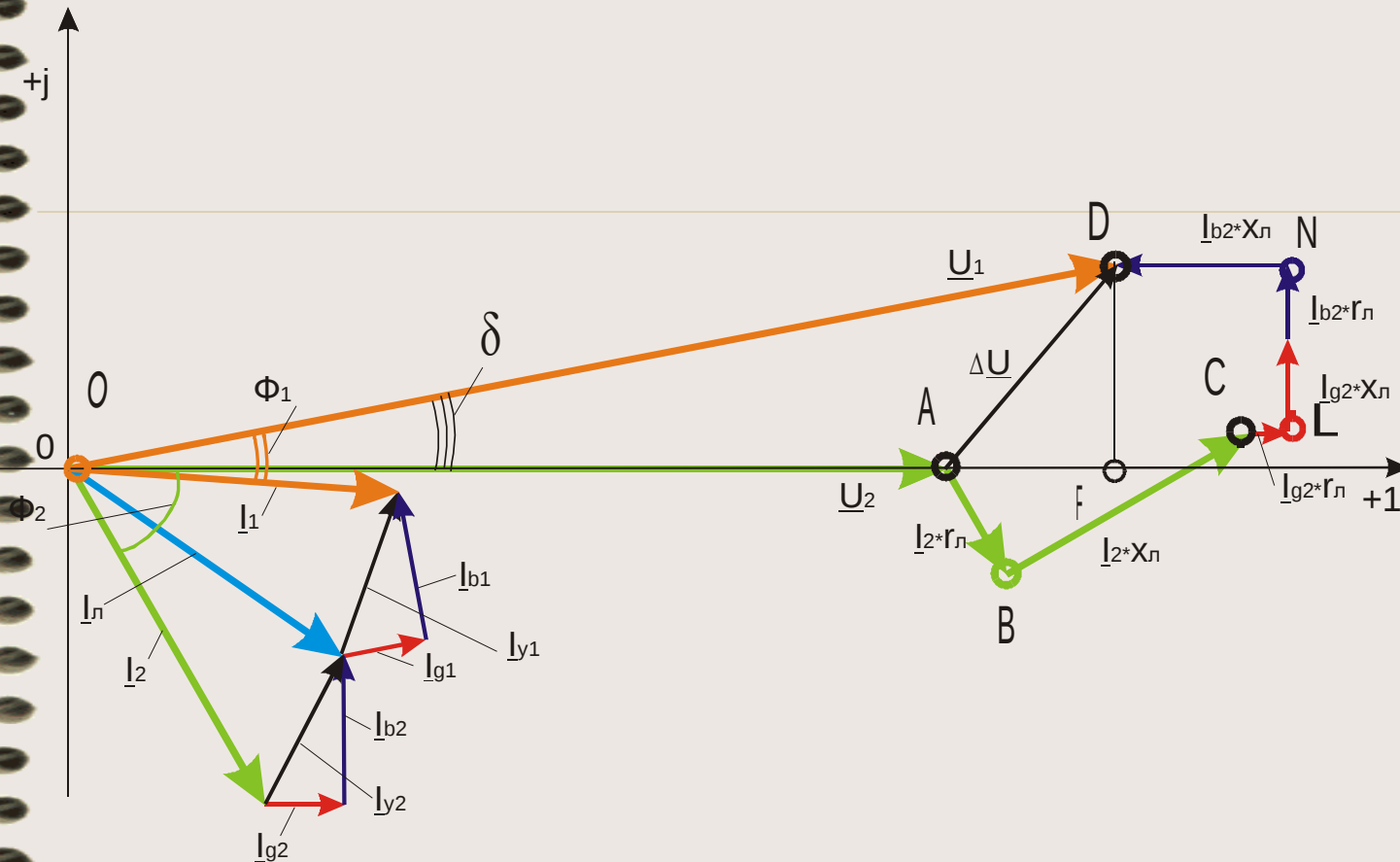
Точка « L » - соответствует концу вектора $\underline{I}_{g2} * r_{\text{л}}$.

Падение напряжения и потеря напряжения



Точка «N» - соответствует концу вектора $\underline{I}_{b2} \cdot r_{\text{л}}$.

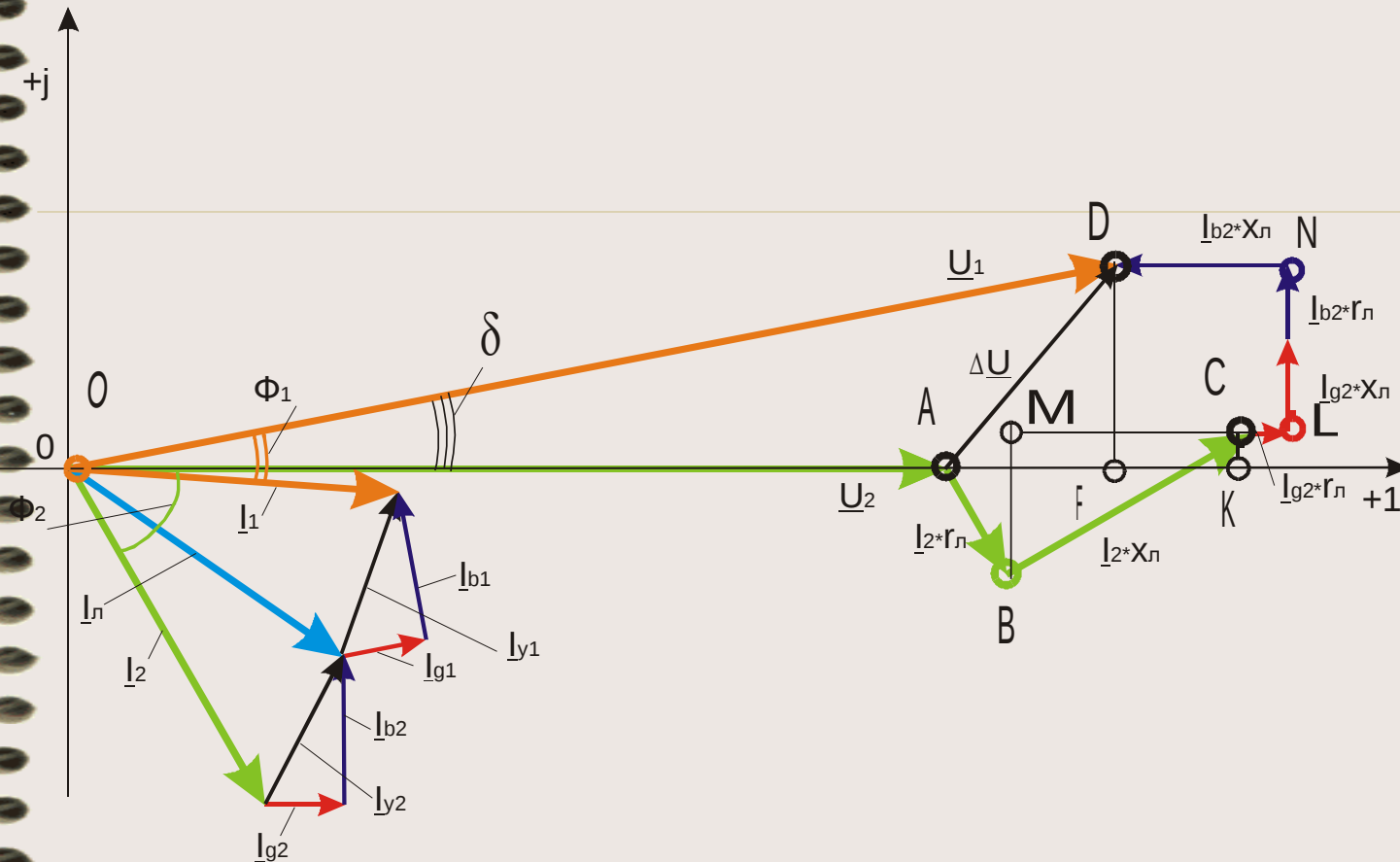
Падение напряжения и потеря напряжения



Точка « F » - проекция точки « D » на ось действительных чисел « $+1$ ».



Падение напряжения и потеря напряжения



Точка « M » - является проекцией точки « B » на прямую, соответствующую направлению вектора $\underline{I}_{g2} \cdot \underline{r}_{\text{л}}$.

+

0

Точка

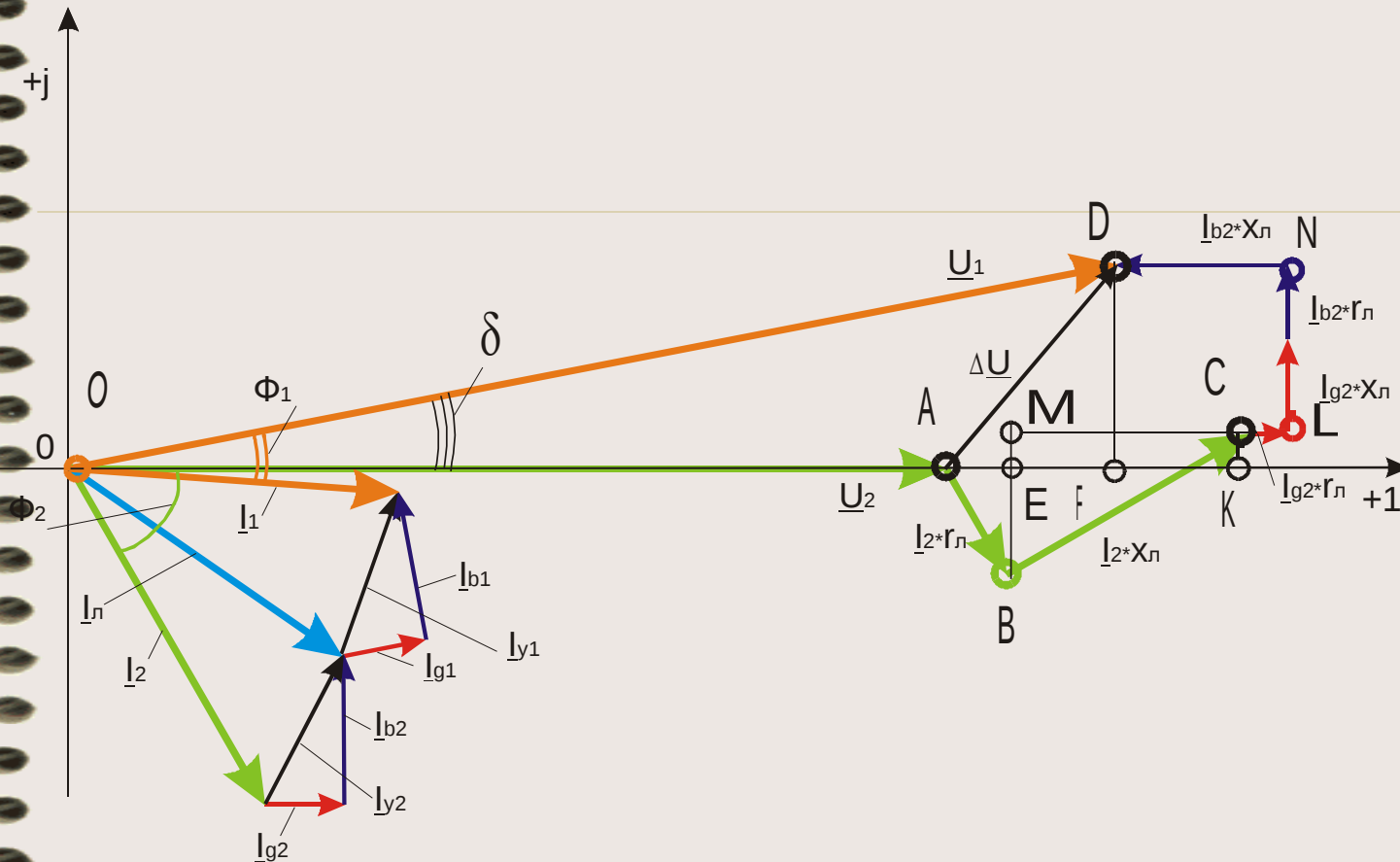


+

0

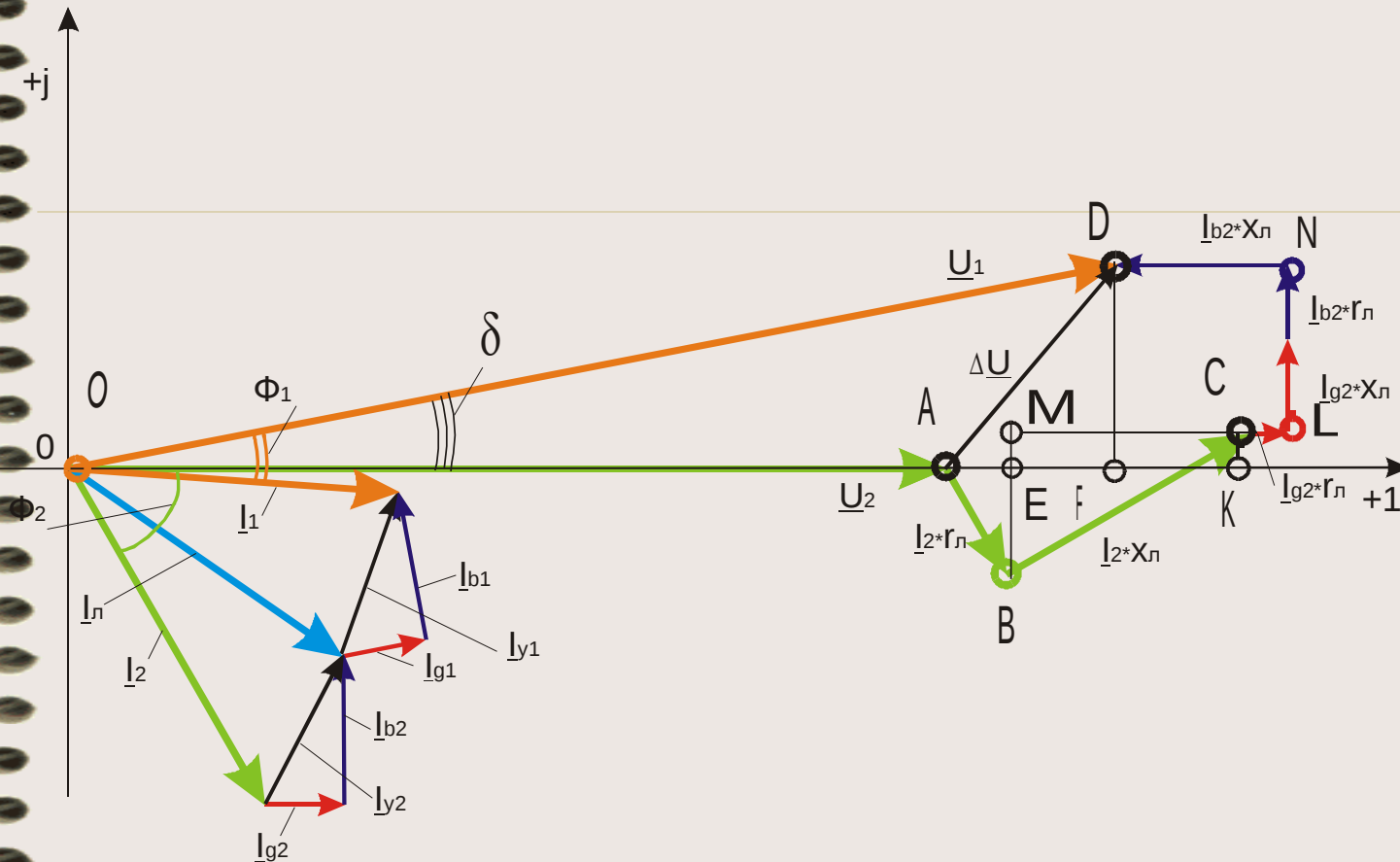
Точка

Падение напряжения и потеря напряжения



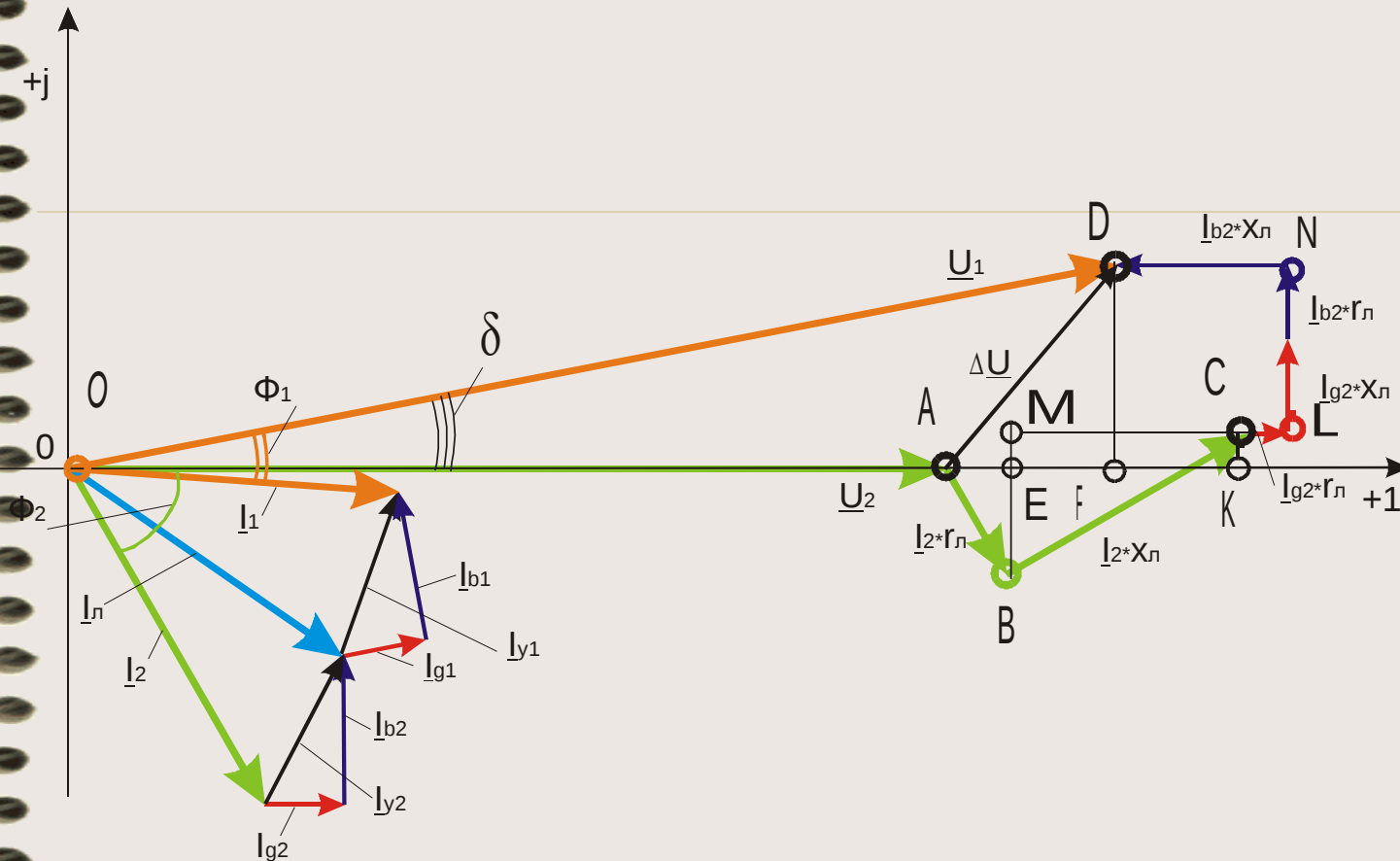
Падения напряжения в активном сопротивлении линии ($\underline{I}_{g2} * r_L$; $\underline{I}_{b2} * r_L$; $\underline{I}_2 * r_L$) называют активными составляющими падения напряжения.

Падение напряжения и потеря напряжения



Падения напряжения в реактивном сопротивлении линии ($\underline{I}_{g2} * x_L$; $\underline{I}_{b2} * x_L$; $\underline{I}_2 * x_L$) называют реактивными составляющими падения напряжения.

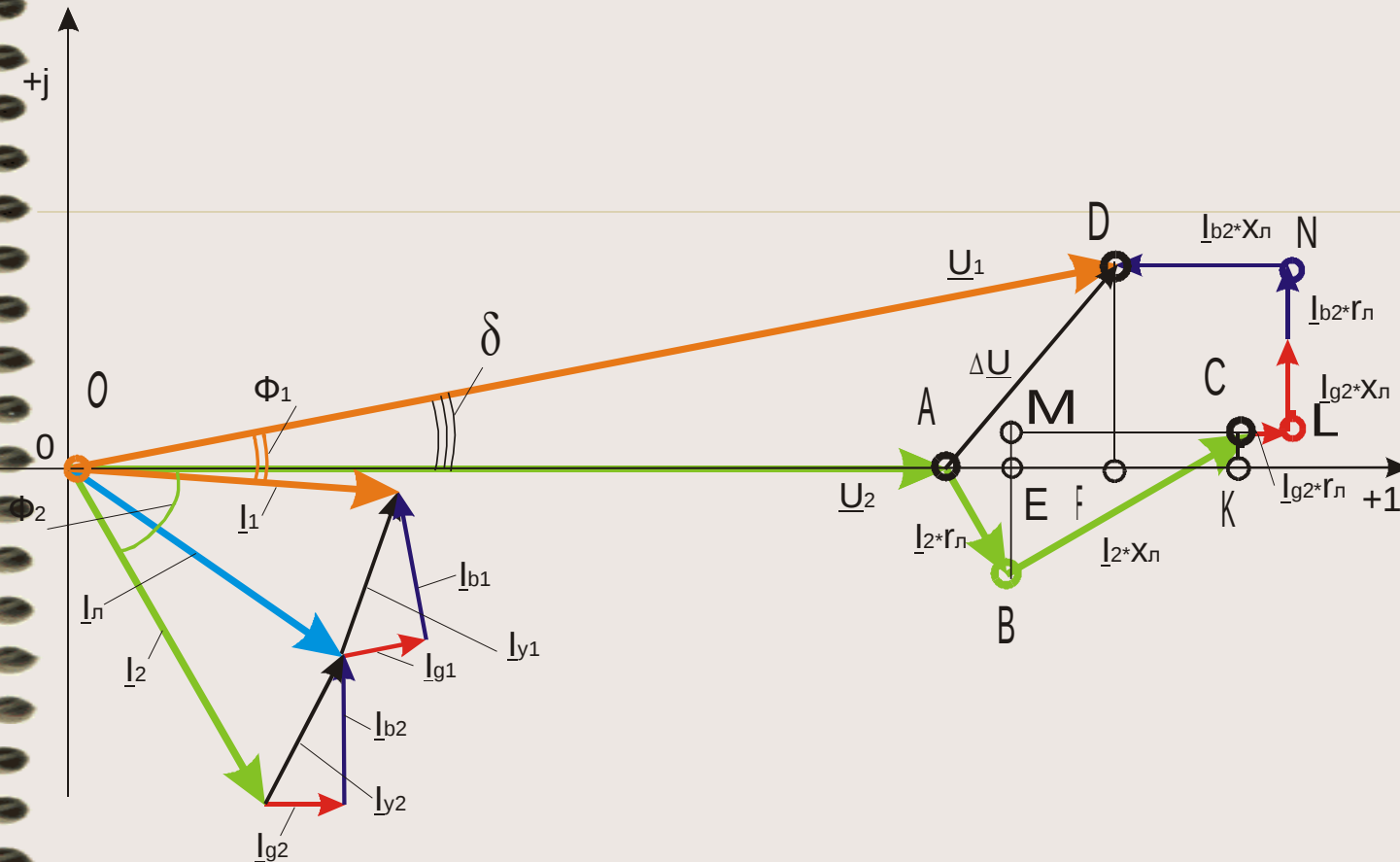
Падение напряжения и потеря напряжения



Полное падение напряжения в линии представляет собой геометрическую разность между векторами напряжения в начале и в конце линии:

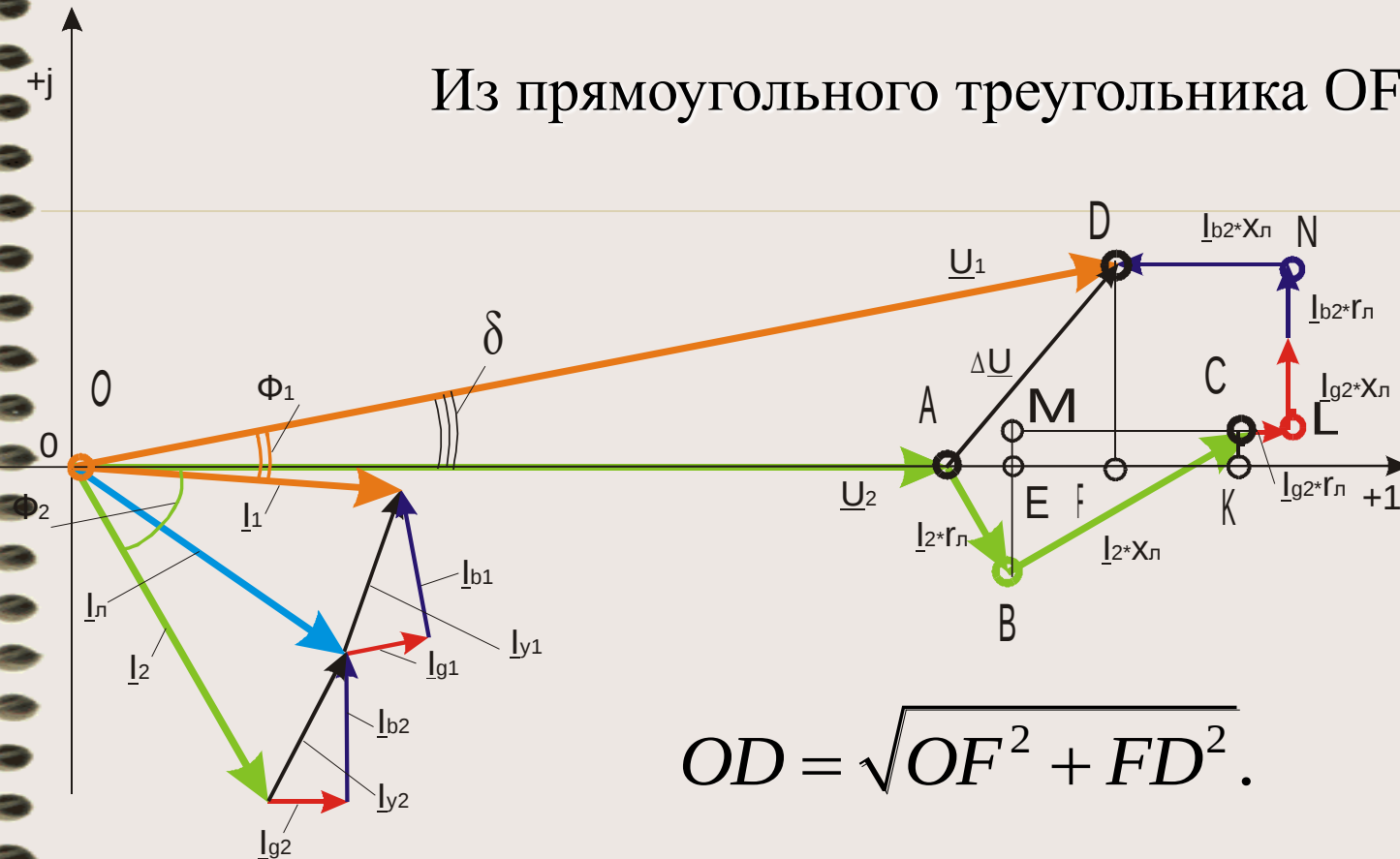
$$\underline{AD} = \Delta \underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2.$$

Падение напряжения и потеря напряжения



Потеря напряжения в линии представляет собой алгебраическую разность между модулями векторов напряжения в начале и в конце линии.

Из прямоугольного треугольника OFD:



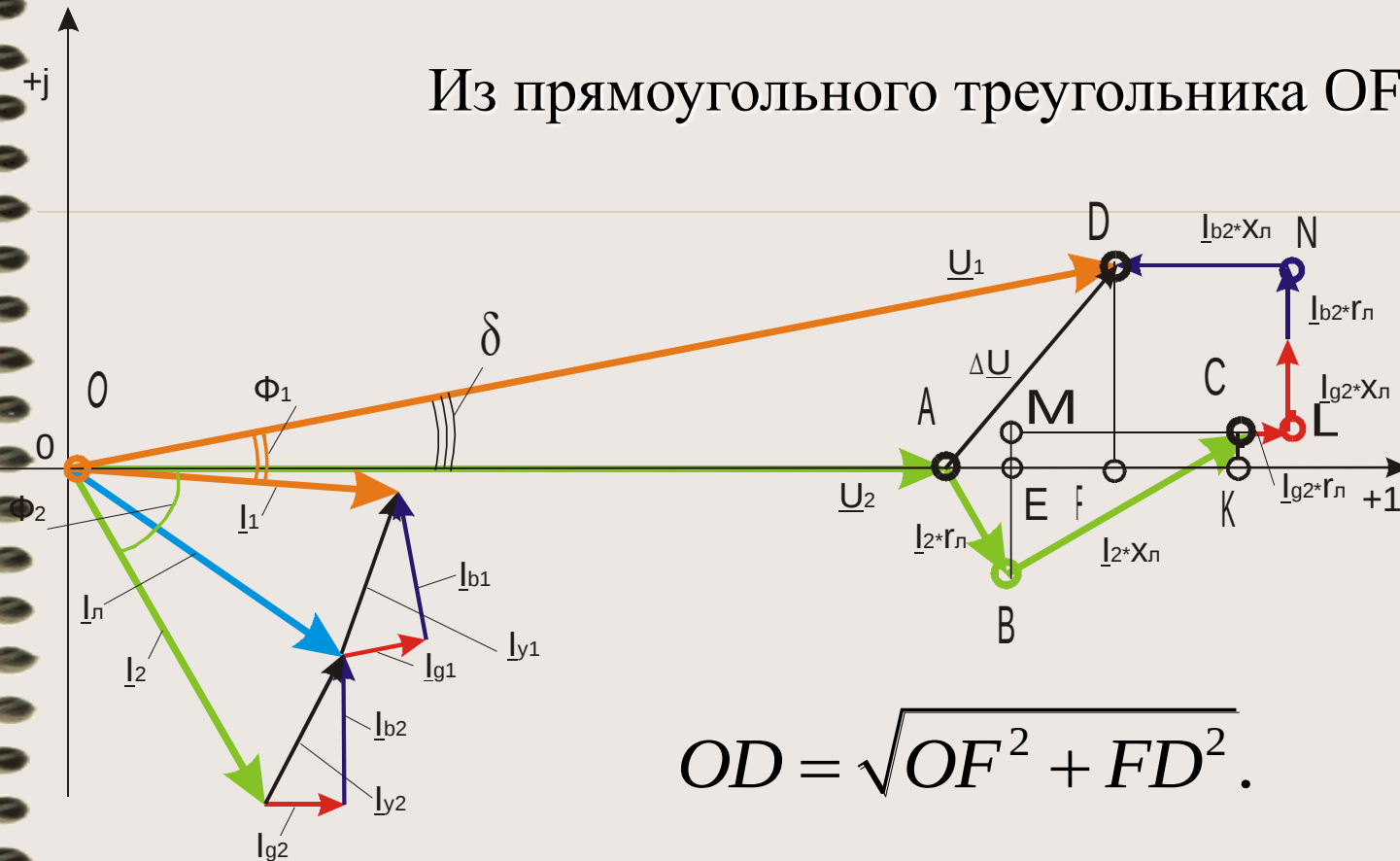
$$OD = \sqrt{OF^2 + FD^2}.$$

$$OF = OA + AE + EK + CL - ND \text{ или:}$$

$$OF = U_2 + I_2 * r_l * \cos \Phi_2 + I_2 * X_l * \sin \Phi_2 + I_{q2} * r_l - I_{b2} * X_l$$

Падение напряжения и потеря напряжения

Из прямоугольного треугольника OFD:



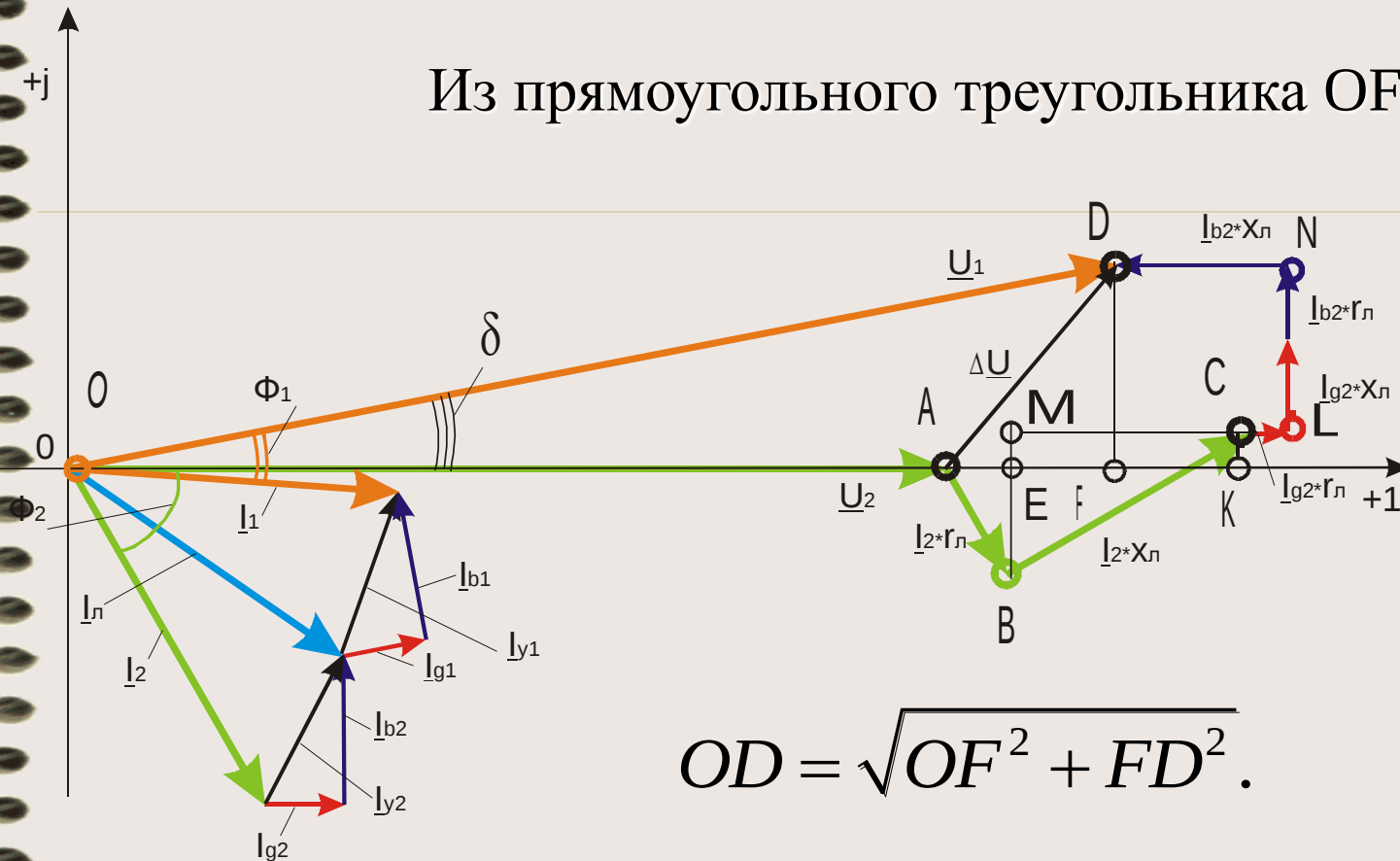
$$OD = \sqrt{OF^2 + FD^2}.$$

$FD = BM - BE + LN$ или:

$$FD = I_2 * X_L * \cos\Phi_2 - I_2 * r_L * \sin\Phi_2 + I_{b2} * r_L + I_{g2} * X_L$$

Падение напряжения и потеря напряжения

Из прямоугольного треугольника OFD:



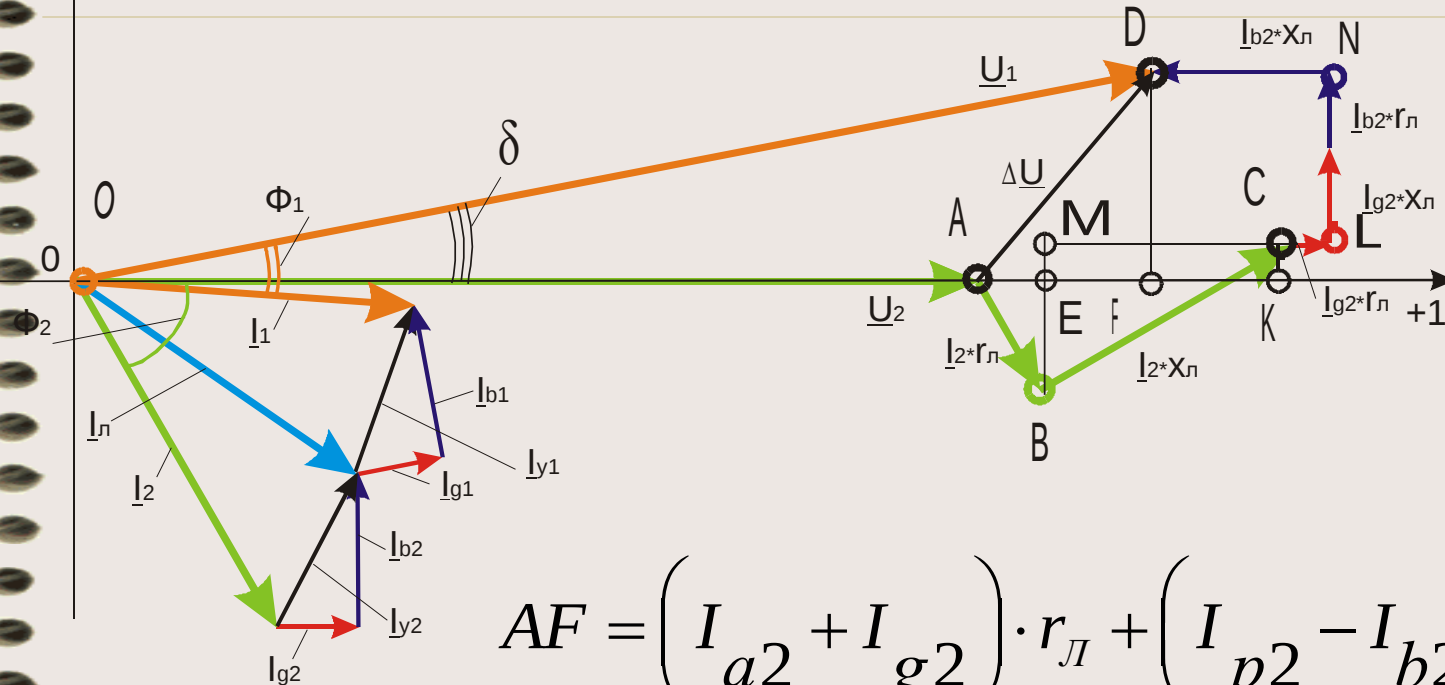
$$OD = \sqrt{OF^2 + FD^2}.$$

Внося выражения для **OF** и **FD** под знак корня получим:

$$U_1 = \sqrt{\left[U_2 + \left(I_2 \cdot \cos \Phi_2 + I_{g2} \right) \cdot r_{\text{л}} + \left(I_2 \cdot \sin \Phi_2 - I_{b2} \right) \cdot x_{\text{л}} \right]^2 + \left[\left(I_2 \cdot \cos \Phi_2 + I_{g2} \right) \cdot x_{\text{л}} - \left(I_2 \cdot \sin \Phi_2 - I_{b2} \right) \cdot r_{\text{л}} \right]^2}$$

Падение напряжения и потеря напряжения

Обозначив активную и реактивную составляющие тока нагрузки I_{a2} и I_{p2} можно записать:

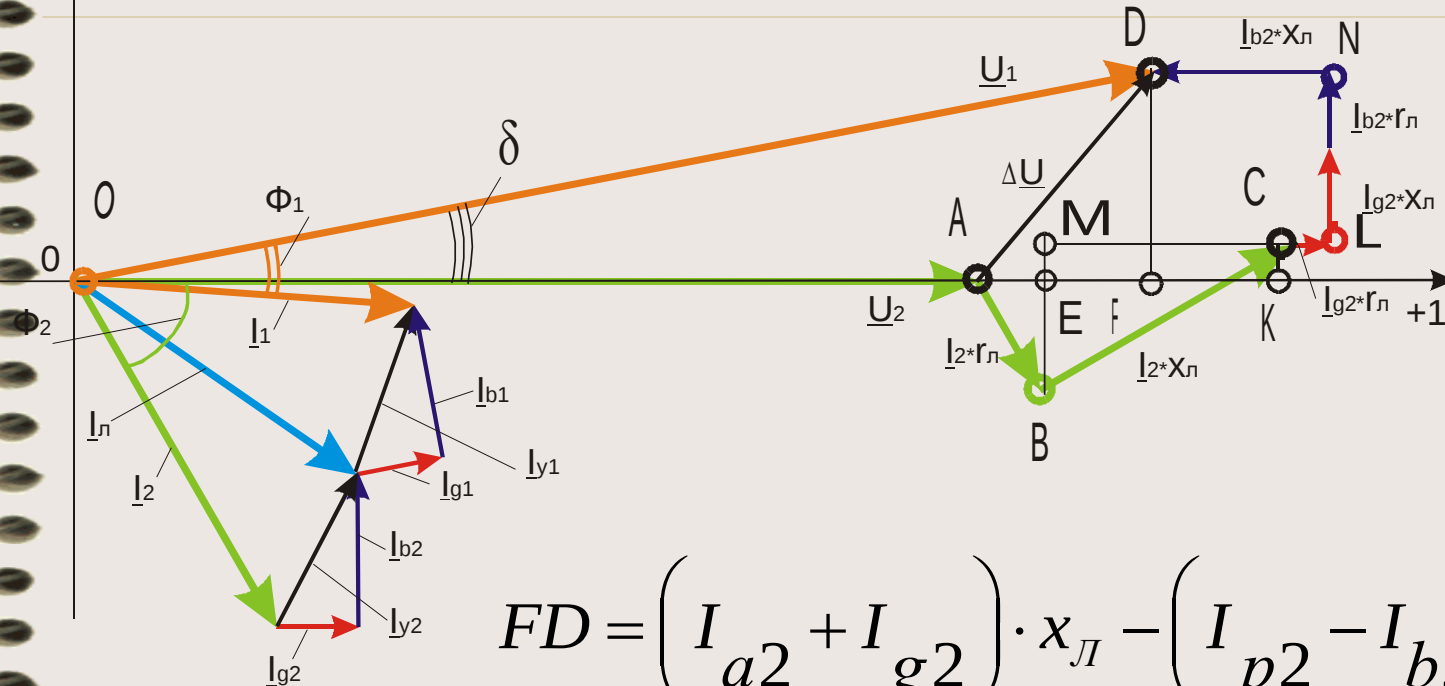


$$AF = \left(I_{a2} + I_{g2} \right) \cdot r_L + \left(I_{p2} - I_{b2} \right) \cdot x_L$$

AF совпадает по направлению с вектором U_2 и называется продольной составляющей вектора падения напряжения.

Падение напряжения и потеря напряжения

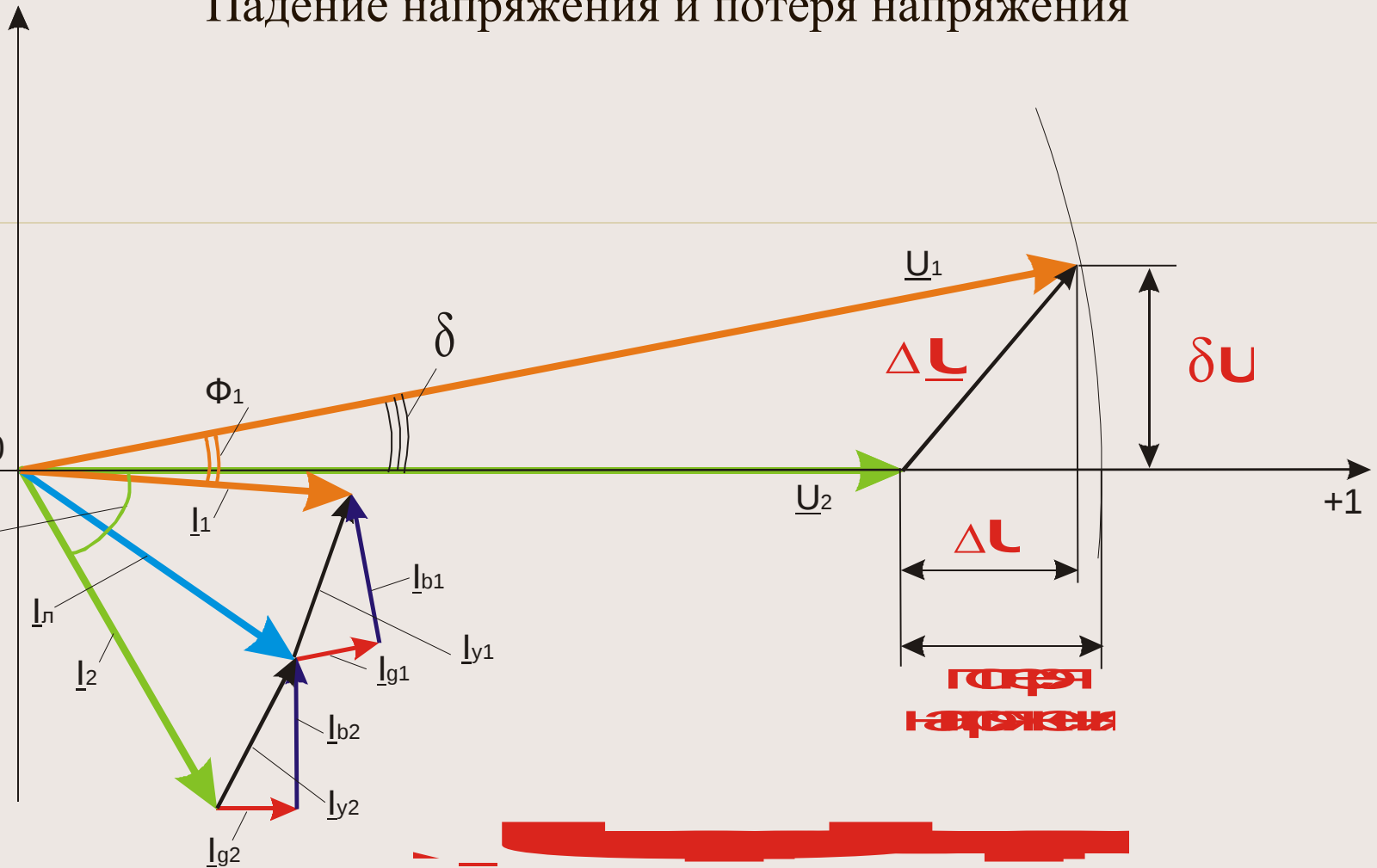
Обозначив активную и реактивную составляющие тока нагрузки I_{a2} и I_{p2} можно записать:



$$FD = \left(I_{a2} + I_{g2} \right) \cdot x_L - \left(I_{p2} - I_{b2} \right) \cdot r_L$$

FD перпендикулярен направлению вектора $\underline{U}_2$ и называется поперечной составляющей вектора падения напряжения.

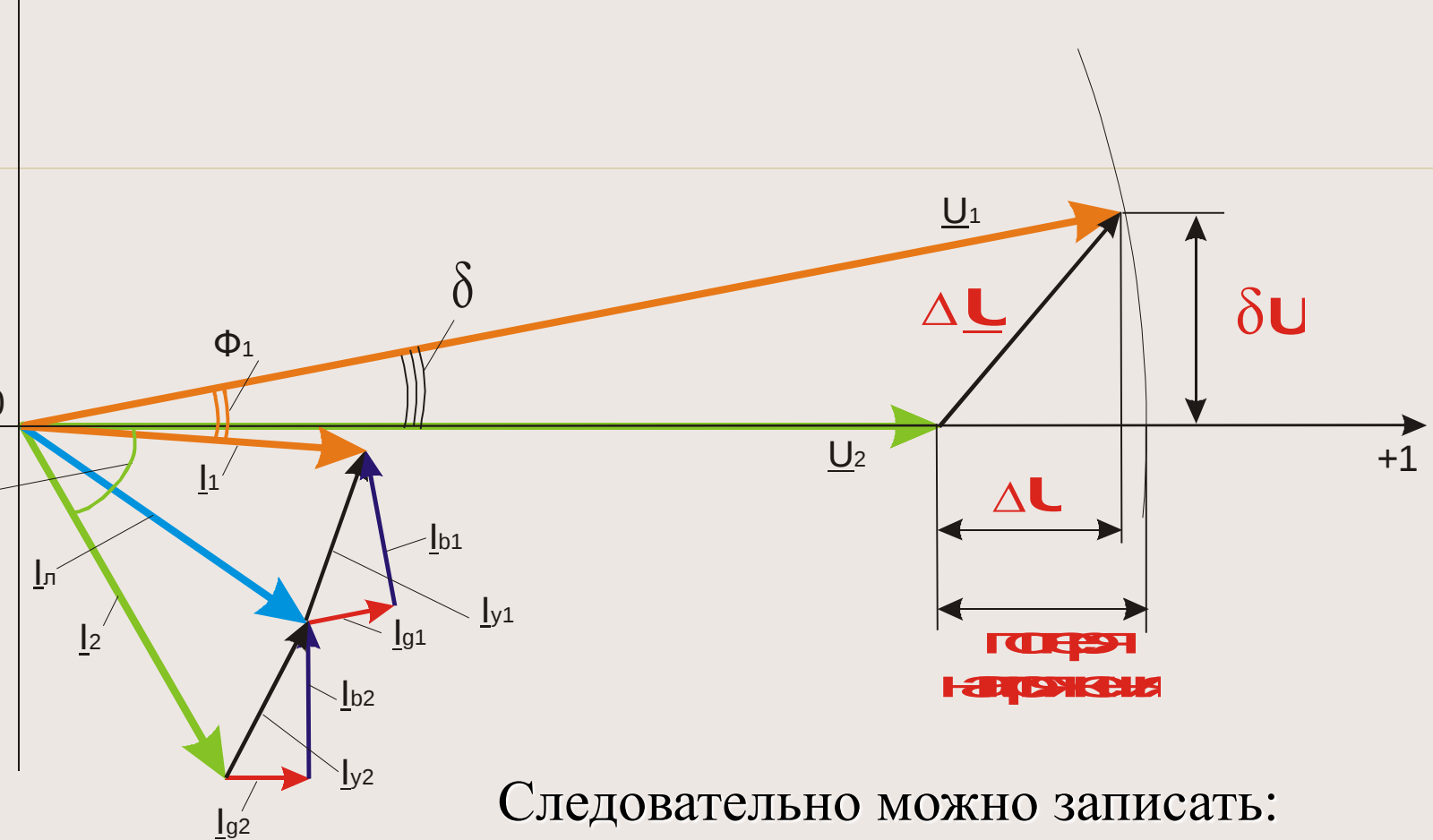
Падение напряжения и потеря напряжения



ΔU - продольная составляющая вектора падения напряжения

δU - поперечная составляющая вектора падения напряжения

Падение напряжения и потеря напряжения



Следовательно можно записать:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2}.$$

Некоторые особенности векторных диаграмм линий

Построение векторной диаграммы для двух линий.

Расчетная схема:

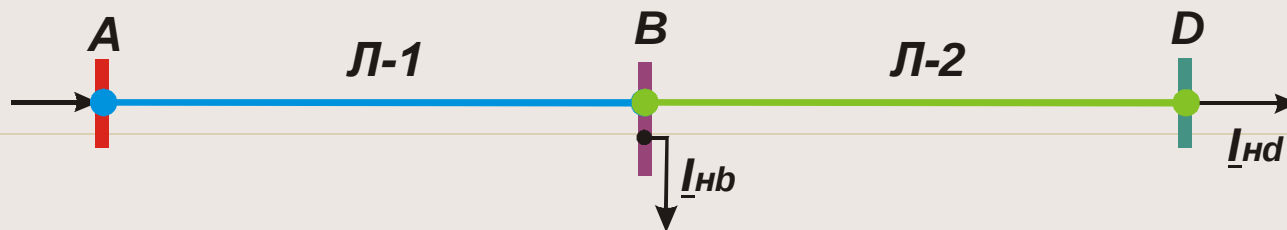
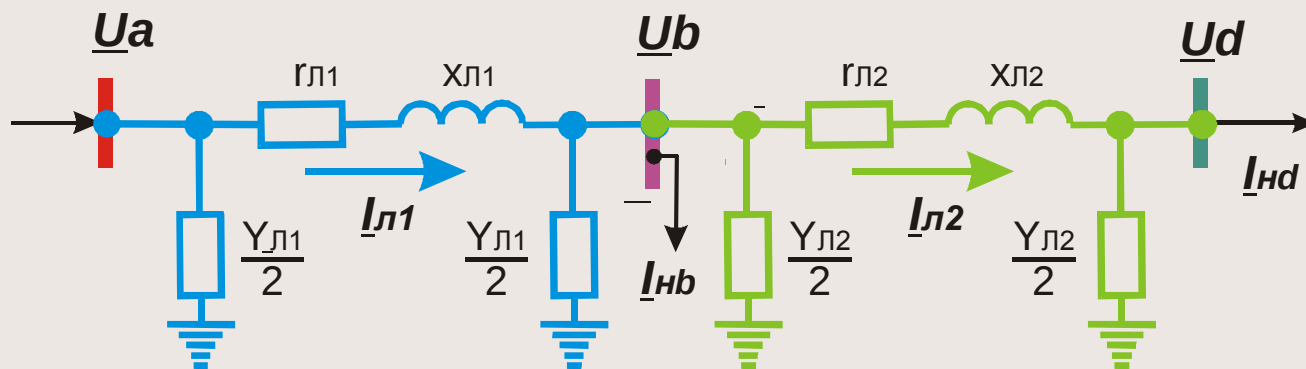
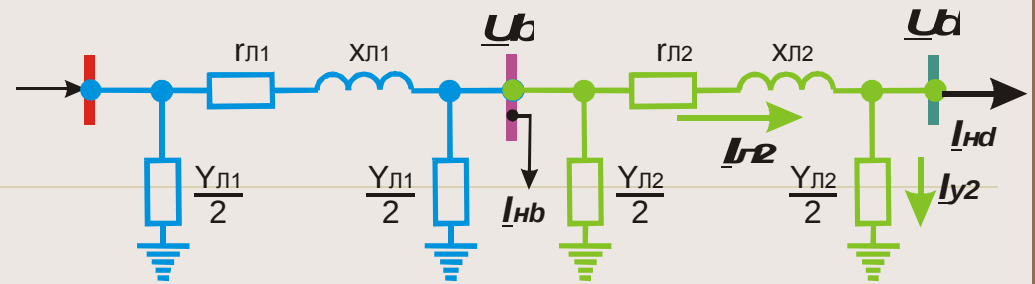


Схема замещения:

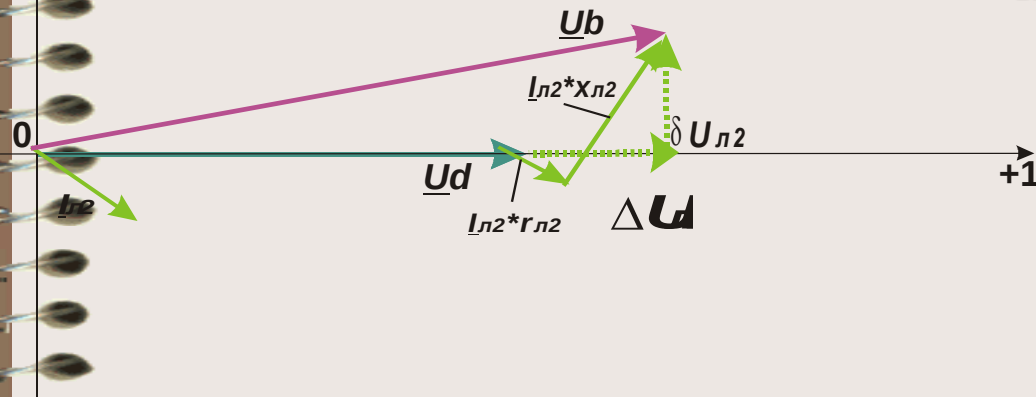


Построение начинается с участка линии Л-2



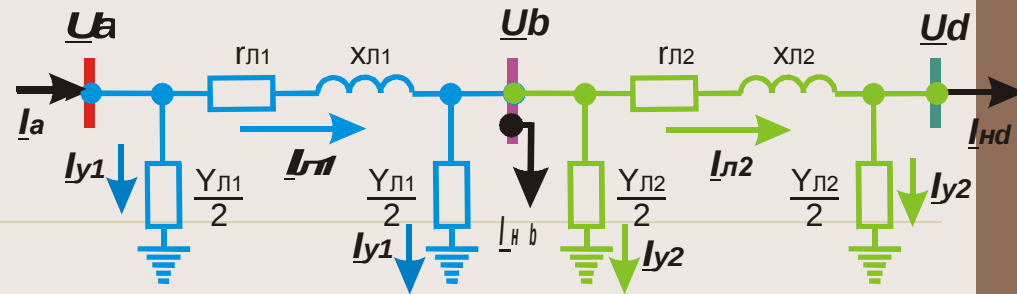
Строится вектор фазного напряжения в конце линии Л-2 $\underline{U}_d$

Вектор тока линии $\underline{I}_{Л2}$ является геометрической суммой токов $\underline{I}_{y2}$ (через проводимость конца Л-2) и $\underline{I}_{нд}$.

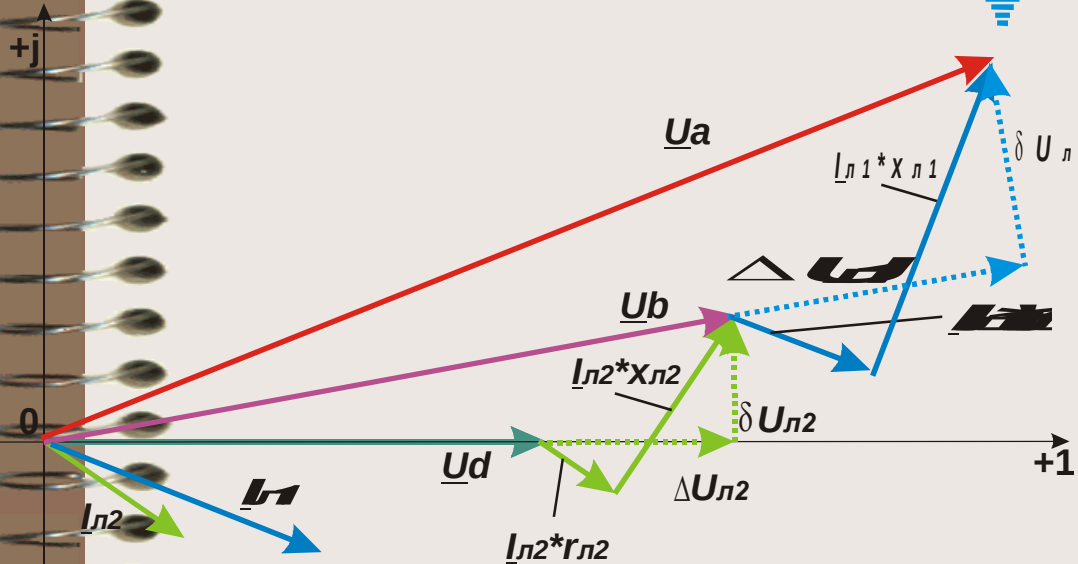


Векторы падения напряжения в сопротивлениях линии Л-2 от протекания по ним тока $\underline{I}_{Л2}$ и вектор напряжения $\underline{U}_b$.

Аналогичные построения проводятся и для линии Л-1



Вектор тока линии $\underline{I}_{Л1}$ является геометрической суммой токов $\underline{I}_{Л2}$, $\underline{I}_{Лb}$, $\underline{I}_{y2}$ (через проводимость начала Л-2) и $\underline{I}_{y1}$ (через проводимость конца Л-1).



Векторы падения напряжения в сопротивлениях линии Л-1 от протекания по ним тока $\underline{I}_{Л1}$ и вектор напряжения $\underline{U}_a$.

Величина тока $\underline{I}_a$ определяется как геометрическая сумма токов $\underline{I}_{Л1}$ и $\underline{I}_{y1}$ (через проводимость начала линии Л-1).

Источники дополнительных сведений

- **Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 588 с.**
- **Электрические системы. Т. 2. Электрические сети/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.**
- **Передача и распределение электрической энергии. Учебное пособие. / Герасименко А.А., Федин В.Т. - Изд. 2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. - 715, [2] с. – (Высшее образование).**
- **Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Изд. 3-е, переработанное. Л., «Энергия», 1977.**
- **Черепанова Г.А., Вычегжанин А.В. Установившиеся режимы электрических сетей в примерах и задачах. - Киров: изд. ВятГУ, 2009 - 114 с.**

Спасибо за внимание!
