

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Факультет радиофизики, электроники и медицинской техники

Кафедра Электротехники и электроэнергетики

Шмелёв В.Е.

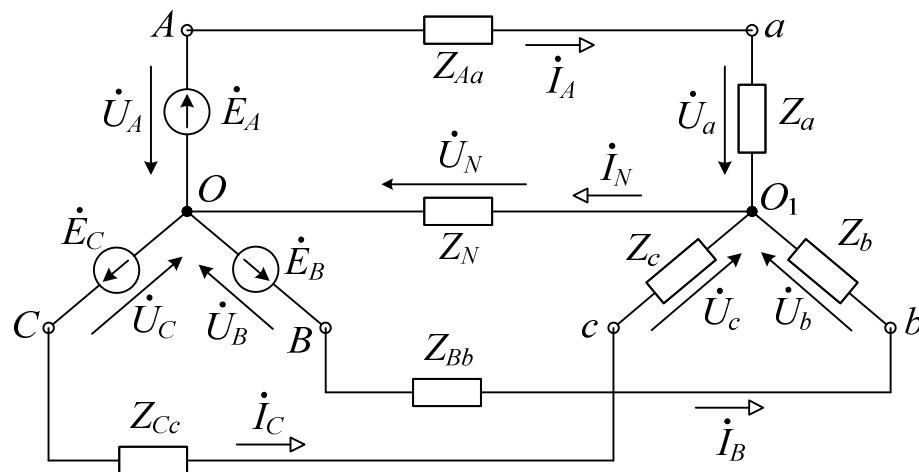
Математические задачи электроэнергетики

Методические указания к лабораторным занятиям
по дисциплине «Математические задачи электроэнергетики» для студентов ВлГУ,
обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Владимир – 2015

Выделение симметричных составляющих из несимметричного режима работы трёхфазных цепей

Задача 1. На рисунке ниже представлена схема замещения трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «звезда-звезда». Фазные ЭДС образуют симметричную трёхфазную систему прямой последовательности. Действующее значение фазной ЭДС на стороне источника $U_\phi = 220$ В. Импедансы подводящих фазных проводов и нейтрали представляют собой случайные величины. Полные сопротивления – случайные величины с нормальным законом распределения в логарифмическом масштабе: математическое ожидание 0.2 Ом, относительное среднеквадратичное отклонение 10%. Аргументы этих сопротивлений – случайная величина с нормальным законом распределения: математическое ожидание 20° , среднеквадратичное отклонение 5° . Импедансы Z_a, Z_b, Z_c – однофазные электрические нагрузки, которые при номинальном напряжении 220 В потребляют случайную активную мощность с нормальным законом распределения в логарифмическом масштабе: математическое ожидание 220 Вт, относительное среднеквадратичное отклонение 10%. Коэффициент мощности – случайная величина с равномерным законом распределения в диапазоне от 0.8 до 1.

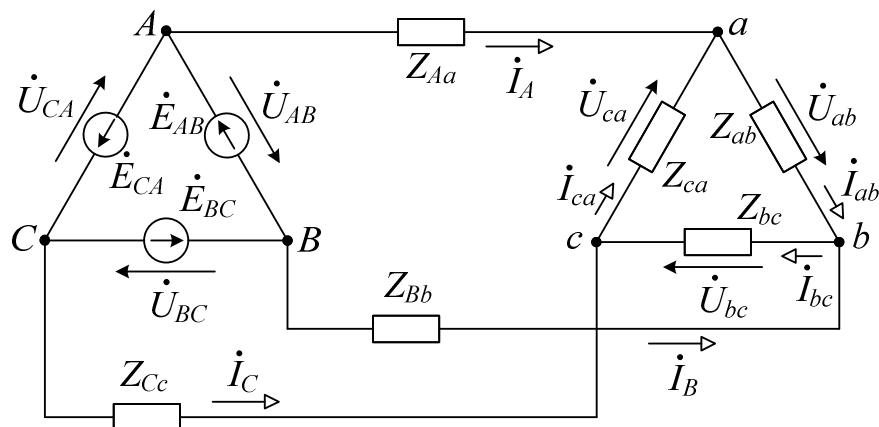


По условию задачи **требуется:** в одной реализации случайного режима определить все обозначенные на схеме комплексные токи и напряжения, определить симметричные составляющие фазных токов и фазных напряжений на стороне трёхфазного приёмника электроэнергии по отношению к первой фазе. Определить комплексные мощности, генерируемые источниками ЭДС, комплексные мощности, потребляемые однофазными приёмниками, суммарные комплексные мощности источников и приёмников, потери комплексной мощности в каждом из подводящих проводов, суммарную потерю комплексной мощности.

Для решения задачи составить вычислительный сценарий в системе MATLAB.

Задача 2. На рисунке представлена схема замещения трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме «треугольник-треугольник». Фазные ЭДС $\dot{E}_{AB}, \dot{E}_{BC}, \dot{E}_{CA}$ образуют симметричную трёхфазную систему прямой последовательности. Действующее значение фазной ЭДС на стороне источника

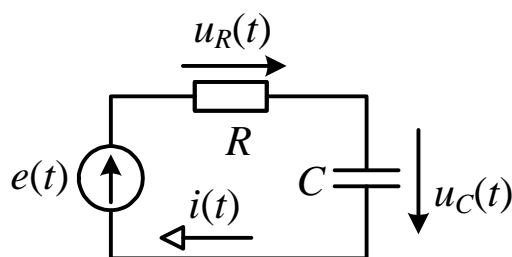
$U_{\phi} = 380$ В. Импедансы подводящих фазных проводов представляют собой случайные величины. Полные сопротивления – случайные величины с нормальным законом распределения в логарифмическом масштабе: математическое ожидание 0.2 Ом, относительное среднеквадратичное отклонение 5%. Аргументы этих сопротивлений – случайная величина с нормальным законом распределения: математическое ожидание 15° , среднеквадратичное отклонение 5° . Импедансы Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – однофазные электрические нагрузки, которые при номинальном напряжении 380 В потребляют случайную активную мощность с нормальным законом распределения в логарифмическом масштабе: математическое ожидание 350 Вт, относительное среднеквадратичное отклонение 10%. Коэффициент мощности – случайная величина с равномерным законом распределения в диапазоне от 0.7 до 1.



По условию задачи **требуется**: в одной реализации случайного режима определить активные и реактивные мощности, генерируемые источниками фазных ЭДС и суммарную генерируемую активную и реактивную мощность. Определить потери активной и реактивной мощности в каждом из подводящих проводов и суммарные мощности потерь в них. Определить активные и реактивные мощности, потребляемые каждой из однофазных нагрузок и суммарные мощности нагрузок. Определить для фазы ab симметричные составляющие напряжения $\dot{U}_{1ab}, \dot{U}_{2ab}, \dot{U}_{0ab}$, симметричные составляющие тока $\dot{I}_{1ab}, \dot{I}_{2ab}, \dot{I}_{0ab}$, симметричные составляющие тока $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{2A}, \dot{I}_{0A}$ (напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательности). Для решения задачи составить вычислительный сценарий в системе MATLAB.

Гармонический и энергетический анализ несинусоидальных периодических режимов линейных электрических цепей

Цепь 1. Пусть имеется последовательная RC -цепочка (рисунок ниже), питаемая от идеального источника ЭДС в форме меандра: $e(t) = E_m \cdot \text{sign}(\sin(\omega t))$. Здесь время измеряется в миллисекундах. Пусть $C = 1 \mu\text{кФ}$, $R = 1 \text{ кОм}$, $\omega = 0.2 \cdot N_{\text{вар}}$ рад/мс, $E_m = 100$ В.



По условию задачи **требуется**: 1) аналитически разложить ЭДС $e(t)$ на гармонические составляющие, рассчитать комплексные амплитуды гармоник ЭДС вплоть до номера 5001; 2) рассчитать комплексные амплитуды тех же номеров гармоник тока $i(t)$ и напряжений $u_R(t)$, $u_C(t)$; 3) рассчитать и построить графики осциллограмм $e(t)$, $u_R(t)$, $u_C(t)$, $i(t)$ для одного периода; 4) определить действующие значения ЭДС, напряжений и тока по осциллограммам и по гармоникам, сравнить действующие значения; 5) определить активную мощность, генерируемую источником ЭДС, по осциллограмме и по гармоникам, сравнить значения активной мощности; 6) определить активные мощности, потребляемые резистором и конденсатором, по осциллограммам и по гармоникам, сравнить значения соответствующих активных мощностей; 7) определить реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и конденсатором, – как сумму реактивных мощностей гармоник; определить соответствующие мощности искажения; 8) определить по формуле Маевского реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и конденсатором; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 9) определить по формуле сдвига реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и конденсатором; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 10) определить по площади динамической вебер- кулонной характеристики реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и конденсатором; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить.

Некоторые формулы

Активная мощность, потребляемая участком электрической цепи:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} P_k,$$

где $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ – мгновенная мощность, P_k – активная мощность k -й гармоники.

Реактивная мощность, потребляемая участком электрической цепи, определяемая как сумма реактивных мощностей гармоник:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k,$$

где Q_k – реактивная мощность k -й гармоники.

Мощность искажения:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

Формула Маевского:

$$Q_M = \frac{1}{2\pi} \int_0^T u(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{i(0)}^{i(T)} u di = -\frac{1}{2\pi} \int_{i(0)}^{i(T)} i du = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot Q_k.$$

Формула сдвига:

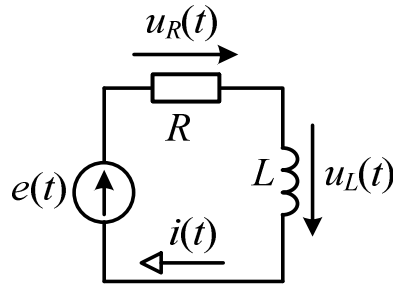
$$Q_c = \frac{1}{T} \int_0^T u\left(t - \frac{T}{4}\right) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i\left(t + \frac{T}{4}\right) dt = \sum_{k=1}^{\infty} (Q_{4k-3} - P_{4k-2} - Q_{4k-1} + P_{4k}).$$

Реактивная мощность, определяемая по площади динамической вебер-кулонной характеристики:

$$Q_{\text{и}} = \frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_0^T \Psi(t) \cdot i(t) dt = -\frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_0^T q(t) \cdot u(t) dt = \frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{q(0)}^{q(T)} \Psi dq = -\frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{\Psi(0)}^{\Psi(T)} q d\Psi = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q_k}{k},$$

где $\Psi(t) = \int_{-\infty}^t u_{\sim}(\tau) d\tau$ – временная первообразная переменной составляющей напряжения на исследуемом участке, которую можно условно назвать «потокосцеплением», $q(t) = \int_{-\infty}^t i_{\sim}(\tau) d\tau$ – временная первообразная переменной составляющей тока на исследуемом участке, которую можно назвать «зарядом».

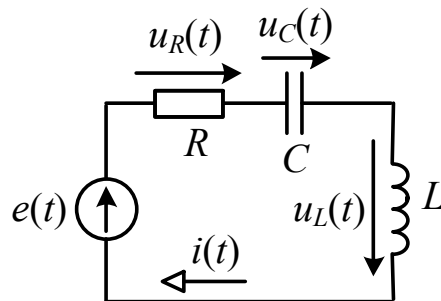
Цепь 2. Пусть имеется последовательная RL -цепочка (рисунок ниже), питаемая от идеального источника ЭДС в форме меандра: $e(t) = E_m \cdot \text{sign}(\sin(\omega t))$. Здесь время измеряется в миллисекундах. Пусть $L = 1 \text{ Гн}$, $R = 1 \text{ кОм}$, $\omega = 0.2 \cdot N_{\text{вар}} \text{ рад/мс}$, $E_m = 100 \text{ В}$.



По условию задачи **требуется**: 1) аналитически разложить ЭДС $e(t)$ на гармонические составляющие, рассчитать комплексные амплитуды гармоник ЭДС вплоть до номера 5001; 2) рассчитать комплексные амплитуды тех же номеров гармоник тока $i(t)$ и напряжений $u_R(t)$, $u_L(t)$; 3) рассчитать и построить графики осциллограмм $e(t)$, $u_R(t)$, $u_L(t)$, $i(t)$ для одного периода; 4) определить действующие значения ЭДС, напряжений и тока по осциллограммам и по гармоникам, сравнить действующие значения; 5) определить активную мощность, генерируемую источником ЭДС, по осциллограмме и по гармоникам, сравнить значения активной мощности; 6) определить активные мощности, потребляемые резистором и индуктивностью, по осциллограммам и по гармоникам, сравнить значения соответствующих активных мощностей; 7) определить реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и индуктивностью, – как сумму реактивных мощно-

стей гармоник; определить соответствующие мощности искажения; 8) определить по формуле Маевского реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и индуктивностью; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 9) определить по формуле сдвига реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и индуктивностью; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 10) определить по площади динамической вебер-кулонной характеристики реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором и индуктивностью; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить.

Цепь 3. Пусть имеется последовательная RLC -цепочка (рисунок ниже), питаемая от идеального источника ЭДС в форме меандра: $e(t) = E_m \cdot \text{sign}(\sin(\omega t))$. Здесь время измеряется в миллисекундах. Пусть $L = 1 \text{ Гн}$, $C = 1 \text{ мкФ}$, $R = 1 \text{ кОм}$, $\omega = 0.2 \cdot N_{\text{вар}}$ рад/мс, $E_m = 100 \text{ В}$.



По условию задачи **требуется**: 1) аналитически разложить ЭДС $e(t)$ на гармонические составляющие, рассчитать комплексные амплитуды гармоник ЭДС вплоть до номера 5001; 2) рассчитать комплексные амплитуды тех же номеров гармоник тока $i(t)$ и напряжений $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$; 3) рассчитать и построить графики осциллограмм $e(t)$, $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$, $i(t)$ для одного периода; 4) определить действующие значения ЭДС, напряжений и тока по осциллограммам и по гармоникам, сравнить действующие значения; 5) определить активную мощность, генерируемую источником ЭДС, по осциллограмме и по гармоникам, сравнить значения активной мощности; 6) определить активные мощности, потребляемые резистором, конденсатором и индуктивностью, по осциллограммам и по гармоникам, сравнить значения соответствующих активных мощностей; 7) определить реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором, конденсатором и индуктивностью, – как сумму реактивных мощностей гармоник; определить соответствующие мощности искажения; 8) определить по формуле Маевского реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором, конденсатором и индуктивностью; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 9) определить по формуле сдвига реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потребляемые резистором, конденсатором и индуктивностью; те же значения рассчитать по гармоникам и сравнить; 10) определить по площади динамической вебер-кулонной характеристики реактивные мощности: генерируемую источником ЭДС и потреб-

ляемые резистором, конденсатором и индуктивностью; те же значения рас-
считать по гармоникам и сравнить.

Примерный вид вычислительного сценария для *RC*-цепи

```
% garm_RC - гармонический анализ RC-цепи, питаемой ЭДС в форме меандра
R=1; % Сопротивление, кОм
C=1; % Ёмкость, мкФ
Em=100; % Амплитуда ЭДС, В
k=1:5001; % Массив номеров гармоник
om=1; % Циклическая частота первой гармоники, рад/мс
T=2*pi/om; % Период изменения ЭДС, мс
t=linspace(0,T,20005); % % Сетка значений времени
nh=length(t)-1; % Число шагов сетки значений времени
nh4=nh/4;
dt=T/nh; % Шаг сетки значений времени
Ekm=4*Em/pi./k.*mod(k,2); % Комплексные амплитуды гармоник ЭДС
Zc=(1i*om*C*k).^(-1); % Комплексное сопротивление конденсатора, кОм
Ikm=Ekm./(R+Zc); % Комплексные амплитуды гармоник тока, мА
UCkm=Ikm.*Zc; % Комплексные амплитуды гармоник напряжения на C, В
URkm=Ikm*R; % Комплексные амплитуды гармоник напряжения на R, В
et=Em*sign(sin(om*t));
it=imag(Ikm*exp(1i*k.*om*t));
urt=imag(URkm*exp(1i*k.*om*t));
uct=imag(UCkm*exp(1i*k.*om*t));
plot(t,[et;urt;uct],'linewidth',2), grid on
Eg=sqrt(Ekm*Ekm'/2); % Действующее значение ЭДС по гармоникам, В
Ig=sqrt(Ikm*Ikm'/2); % Действующее значение тока по гармоникам, мА
UCg=sqrt(UCkm*UCkm'/2); % Действующее значение UC по гармоникам, В
URg=sqrt(URkm*URkm'/2); % Действующее значение UR по гармоникам, В
I=sqrt(sum(it(1:end-1).^2+it(2:end).^2)*dt/T/2); % ДЗ тока, мА
UC=sqrt(sum(uct(1:end-1).^2+uct(2:end).^2)*dt/T/2); % ДЗ UC, В
UR=sqrt(sum(urt(1:end-1).^2+urt(2:end).^2)*dt/T/2); % ДЗ UR, В
pe=et.*it; % Мгновенная мощность, генерируемая источником ЭДС, мВт
PE=sum(pe(1:end-1)+pe(2:end))*dt/T/2; % Активная мощность ист-ка ЭДС, мВт
PEg=real(Ekm*Ikm'/2); % Активная мощность ист-ка ЭДС по гармоникам, мВт
pr=urt.*it; % Мгновенная мощность, потребляемая резистором, мВт
PR=sum(pr(1:end-1)+pr(2:end))*dt/T/2; % Активная мощность резистора, мВт
PRg=real(URkm*Ikm'/2); % Активная мощность резистора по гармоникам, мВт
pc=uct.*it; % Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором, мВт
PC=sum(pc(1:end-1)+pc(2:end))*dt/T/2; % Активная мощность конденсатора, мВт
PCg=real(UCkm*Ikm'/2); % Активная мощность конденсатора по гармоникам, мВт
QEG=imag(Ekm*Ikm'/2); % Реактивная мощность ист-ка ЭДС по гармоникам, мВАр
QRG=imag(URkm*Ikm'/2); % Реактивная мощность резистора по гармоникам, мВАр
QCG=imag(UCkm*Ikm'/2); % Реактивная мощность конденсатора по гарм-кам, мВАр
SEG=Eg*Ig; % Полная мощность, генерируемая ист-ком ЭДС (по гарм-кам), мВА
NEG=sqrt(SEG^2-PEg^2-QEG^2); % Мощн искаж-я ист-ка ЭДС (по гарм-кам), мВА
SRG=URg*Ig; % Полная мощность, потребляемая резистором (по гарм-кам), мВА
NRG=sqrt(SRG^2-PRg^2-QRG^2); % Мощн искаж-я резистора (по гарм-кам), мВА
SCG=UCg*Ig; % Полная мощность, потребляемая резистором (по гарм-кам), мВА
NCG=sqrt(SCG^2-PCg^2-QCG^2); % Мощн искаж-я резистора (по гарм-кам), мВА
QEMg=imag(Ekm.*k*Ikm'/2); % Реакт мощн ист ЭДС по Ма по гар, мВАр
QRMg=imag(URkm.*k*Ikm'/2); % Реакт мощн резистора по Ма по гар, мВАр
QCMg=imag(UCkm.*k*Ikm'/2); % Реакт мощн конденсатора по Ма по гар, мВАр
duc=diff(uct);
QCM=-dot(it(1:end-1)+it(2:end),duc)/pi/4; % Реакт мощн конд-ра по Ма, мВАр
% Определение реактивных мощностей по формуле сдвига
it4=[it(1+nh4:end),it(2:1+nh4)]; % i(t+T/4)
qe=et.*it4;
QEs=sum(qe(1:end-1)+qe(2:end))*dt/T/2; % Реакт мощн ист-ка ЭДС (сдв), мВАр
qr=urt.*it4;
QRs=sum(qr(1:end-1)+qr(2:end))*dt/T/2; % Реакт мощн рез (сдв), мВАр
qc=uct.*it4;
QCs=sum(qc(1:end-1)+qc(2:end))*dt/T/2; % Реакт мощн рез (сдв), мВАр
```

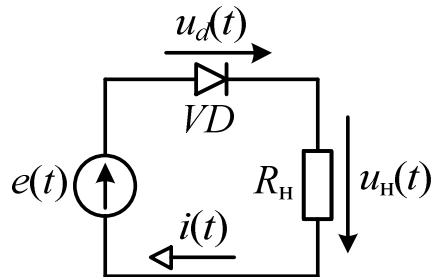
```

QEsg=imag(Ekm(1:4:end)*Ikm(1:4:end)'/2-Ekm(3:4:end)*Ikm(3:4:end)'/2);
QRsg=imag(URkm(1:4:end)*Ikm(1:4:end)'/2-URkm(3:4:end)*Ikm(3:4:end)'/2);
QCsg=imag(Uckm(1:4:end)*Ikm(1:4:end)'/2-Uckm(3:4:end)*Ikm(3:4:end)'/2);
% Определение реактивных мощностей по площадям динамических вебер-к х
qt=cumsum([0,it(1:end-1)+it(2:end)])*dt/2;
qei=et.*qt;
QEi=-sum(qei(1:end-1)+qei(2:end))*dt*om/T/2; % Реакт мощн ЭДС (инт), мВАр
qci=uct.*qt;
QCi=-sum(qci(1:end-1)+qci(2:end))*dt*om/T/2; % Реакт мощн С (инт), мВАр
qri=urt.*qt;
QRi=-sum(qri(1:end-1)+qri(2:end))*dt*om/T/2; % Реакт мощн R (инт), мВАр
QEig=imag(Ekm./k*Ikm'/2); % Реакт мощн ист ЭДС (инт) по гар, мВАр
QRig=imag(URkm./k*Ikm'/2); % Реакт мощн резистора (инт) по гар, мВАр
QCig=imag(Uckm./k*Ikm'/2); % Реакт мощн конденсатора (инт) по гар, мВАр

```

Анализ статических режимов работы диодных выпрямителей

Цепь 1. Имеется простейший диодный однополупериодный выпрямитель, схема которого вместе с источником и резистивным приёмником представлена ниже.



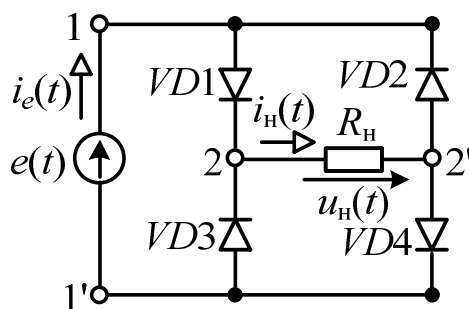
ЭДС источника изменяется во времени по синусоидальному закону с амплитудой $E_m = N_{\text{вар}}$ В. Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 2 \cdot N_{\text{вар}}$ Ом. Вольт-амперная характеристика диода задана таблично:

| | | | | | |
|-----------|---|------|-----|------|-----|
| u_d , В | 0 | 0.28 | 0.4 | 0.48 | 0.5 |
| i , мА | 0 | 1 | 100 | 500 | 600 |

При $u_d < 0$ $i=0$.

По условию задачи **требуется**: 1) построить график двух периодов изменения напряжения на нагрузке по 2049 точкам с равномерным шагом по времени; 2) в другой фигуре построить графики (осциллограммы) двух периодов изменения мгновенной мощности, генерируемой источником ЭДС (входной мощности выпрямителя), и мгновенной мощности, потребляемой нагрузкой, по 2049 точкам с равномерным шагом по времени; 3) определить активную и полную мощность, генерируемую источником ЭДС, активную мощность, потребляемую нагрузкой, а также КПД и коэффициент мощности выпрямителя в данном режиме работы; 4) определить реактивную мощность, генерируемую источником ЭДС, по формуле Маевского, по формуле сдвига, по площади динамической вебер-кулонной характеристики; сравнить полученные значения.

Цепь 2. Имеется мостовой диодный двухполупериодный выпрямитель, схема которого вместе с источником и резистивным приёмником представлена ниже.



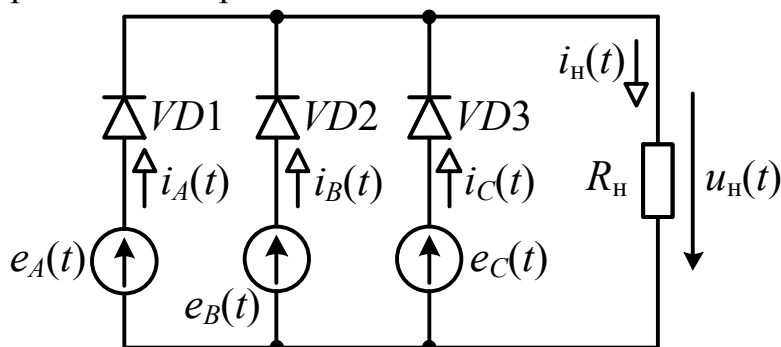
ЭДС источника изменяется во времени по синусоидальному закону с амплитудой $E_m = N_{\text{вар}}$ В. Сопротивление нагрузки $R_H = 2 \cdot N_{\text{вар}}$ Ом. Вольт- амперная характеристика диода задана таблично:

| | | | | | |
|------------------|---|------|-----|------|-----|
| $u_d, \text{ В}$ | 0 | 0.28 | 0.4 | 0.48 | 0.5 |
| $i, \text{ мА}$ | 0 | 1 | 100 | 500 | 600 |

При $u_d < 0$ $i=0$.

По условию задачи **требуется**: 1) построить график двух периодов изменения напряжения на нагрузке по 2049 точкам с равномерным шагом по времени; 2) в другой фигуре построить графики (осциллограммы) двух периодов изменения мгновенной мощности, генерируемой источником ЭДС (входной мощности выпрямителя), и мгновенной мощности, потребляемой нагрузкой, по 2049 точкам с равномерным шагом по времени; 3) определить активную и полную мощность, генерируемую источником ЭДС, активную мощность, потребляемую нагрузкой, а также КПД и коэффициент мощности выпрямителя в данном режиме работы; 4) определить реактивную мощность, генерируемую источником ЭДС, по формуле Маевского, по формуле сдвига, по площади динамической вебер- кулонной характеристики; сравнить полученные значения.

Цепь 3. Имеется трёхфазный диодный однополупериодный (трёхпульсный) выпрямитель, схема которого вместе с трёхфазным источником ЭДС и резистивным приёмником представлена ниже.



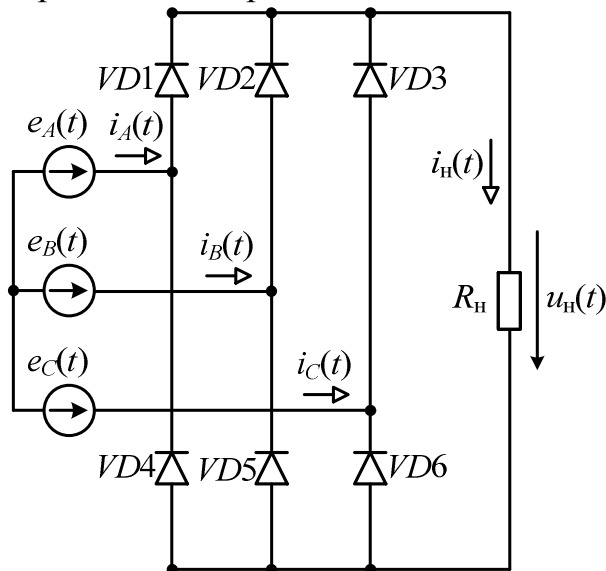
ЭДС источников изменяются во времени по синусоидальному закону с амплитудой $E_m = N_{\text{вар}}$ В и образуют симметричную систему чередования фаз прямой последовательности. Сопротивление нагрузки $R_H = 2 \cdot N_{\text{вар}}$ Ом. Вольт- амперная характеристика диода задана таблично:

| | | | | | |
|------------------|---|------|-----|------|-----|
| $u_d, \text{ В}$ | 0 | 0.28 | 0.4 | 0.48 | 0.5 |
| $i, \text{ мА}$ | 0 | 1 | 100 | 500 | 600 |

При $u_d < 0$ $i=0$.

По условию задачи **требуется**: 1) построить график двух периодов изменения напряжения на нагрузке по 3073 точкам с равномерным шагом по времени; 2) в другой фигуре построить графики (осциллограммы) двух периодов изменения мгновенной мощности, генерируемой тремя фазами ЭДС (входной мощности выпрямителя), и мгновенной мощности, потребляемой нагрузкой, по 3073 точкам с равномерным шагом по времени; 3) определить активную и полную мощность, генерируемую источником ЭДС, активную мощность, потребляемую нагрузкой, а также КПД и коэффициент мощности выпрямителя в данном режиме работы; 4) определить реактивную мощность, генерируемую тремя фазами ЭДС, по формуле Маевского, по формуле сдвига, по площади динамической вебер-кулонной характеристики; сравнить полученные значения.

Цепь 4. Имеется трёхфазный диодный двухполупериодный (шестипульсный) выпрямитель, схема которого вместе с трёхфазным источником ЭДС и резистивным приёмником представлена ниже.



ЭДС источников изменяются во времени по синусоидальному закону с амплитудой $E_m = N_{\text{вар}}$ В и образуют симметричную систему чередования фаз прямой последовательности. Сопротивление нагрузки $R_n = 4 \cdot N_{\text{вар}}$ Ом. Вольт-амперная характеристика диода задана таблично:

| | | | | | |
|-----------|---|------|-----|------|-----|
| u_d , В | 0 | 0.28 | 0.4 | 0.48 | 0.5 |
| i , мА | 0 | 1 | 100 | 500 | 600 |

При $u_d < 0$ $i=0$.

По условию задачи **требуется**: 1) построить график двух периодов изменения напряжения на нагрузке по 3073 точкам с равномерным шагом по времени; 2) в другой фигуре построить графики (осциллограммы) двух периодов изменения мгновенной мощности, генерируемой тремя фазами ЭДС (входной мощности выпрямителя), и мгновенной мощности, потребляемой нагрузкой, по 3073 точкам с равномерным шагом по времени; 3) определить активную и полную мощность, генерируемую источником ЭДС, активную мощность, потребляемую нагрузкой, а также КПД и коэффициент мощности выпрямителя в данном режиме работы; 4) определить реактивную мощность,

генерируемую тремя фазами ЭДС, по формуле Маевского, по формуле сдвига, по площади динамической вебер- кулонной характеристики; сравнить полученные значения.

Анализ радиальной системы электроснабжения низкого напряжения с компенсаторами реактивной мощности вблизи электроприёмников

Имеется группа симметричных трёхфазных приёмников электроэнергии, питаемых от общей сети низкого напряжения. Даны номинальные активные мощности приёмников и их номинальные коэффициенты мощности. Линейное напряжение равно 380 В. Каждый приёмник питает отдельная кабельная линия с погонным комплексным сопротивлением каждого провода $(0.4+0.1j)$ Ом/км. Длина каждой линии дана. Каждый из приёмников работает совместно с конденсаторной установкой. Даны значения тангенса угла разности фаз между напряжением и током при совместной работе приёмника и конденсаторной установки. Конденсаторные установки работают в непосредственной близости от приёмников, тангенсы углов диэлектрических потерь в них даны. Определить потери активной и реактивной мощности в каждой линии и во всех линиях, а также реактивные мощности, генерируемые каждой из конденсаторных установок. Определить потери активной мощности в каждой из конденсаторных установок, а также суммарную потерю активной мощности в них. Потерями напряжения в линиях пренебречь. Определить потери активной и реактивной мощности в каждой линии и во всех линиях, если конденсаторные установки не включены. Сравнить полученные потери в линиях при работающих и неработающих конденсаторных установках.

```
clo=clock;
```

```
rand('twister',clo(end)/60*2^32)
```

```
N=11; % Число приёмников в группе
```

```
P=10*rand(1,N) % Номинальные активные мощности приёмников, кВт
```

```
cofi=0.7+0.2*rand(1,N) % Номинальные коэффициенты мощности приёмников
```

```
taficomp=0.1*exp(0.1*randn(1,N)); % тангенсы угла разности фаз . . .
```

```
Dli=100*rand(1,N); % Длины питающих линий, м
```

```
tade=1E-3*exp(0.1*randn(1,N)); % тангенсы угла диэлектрических потерь КУ
```

Примерный вид вычислительного сценария:

```
% r_w_ku - Расчёт потерь комплексной мощности в линиях, питающих приёмники,  
% работающие совместно с конденсаторными установками (КУ)
```

```
% Инициализация генератора случайных чисел
```

```
clo=clock;
```

```
rand('twister',clo(end)/60*2^32)
```

```
% Исходные данные:
```

```
N=11; % Число приёмников в группе
```

```
P=10*rand(1,N); % Номинальные активные мощности приёмников, кВт
```

```
cofi=0.7+0.2*rand(1,N); % Номинальные коэффициенты мощности приёмников
```

```
taficomp=0.1*exp(0.1*randn(1,N)); % тангенсы угла разности фаз после КРМ
```

```
Dli=100*rand(1,N); % Длины питающих линий, м
```

```
rl=0.4+0.1i; % Погонный импеданс питающих линий, Ом/км
```

```
Ul=380; % Линейное напряжение приёмников электроэнергии, В
```

```
tade=1E-3*exp(0.1*randn(1,N)); % тангенсы угла диэлектрических потерь КУ
```

```
% Коэффициенты мощности приёмников после компенсации реактивной мощности:
```

```
coficomp=(taficomp.^2+1).^-0.5;
```

```
tgf=sqrt(cofi.^-2-1); % тангенсы угла разности фаз до компенсации
```

```

% Реактивные мощности, генерируемые каждой из КУ, кВАр:
Qcond=P.*(tgf-taficomп)./(1+taficomп.*tade);
% Активные мощности, потребляемые каждой из КУ, кВт:
Pcond=Qcond.*tade;
% Комплексные мощности потерь в линиях, ВА:
Sl=((P+Pcond)./coficomp/Ul).^2*r1.*Dli*1000;
Sa=sum(Sl); % Комплексная мощность потерь во всех линиях
% Комплексные мощности потерь в линиях без компенсации РМ, ВА:
Sbl=((P+Pcond)./cofi/Ul).^2*r1.*Dli*1000;
Sba=sum(Sbl); % Комплексная мощность потерь во всех линиях
disp('Номинальные активные мощности приёмников, кВт')
disp(mat2str(P,5))
disp('Номинальные коэффициенты мощности приёмников')
disp(mat2str(cofi,5))
disp('Тангенсы угла разности фаз напряжения и тока после компенсации')
disp(mat2str(taficomп,5))
disp('Длины питающих линий, м')
disp(mat2str(Dli,5))
disp('Тангенсы угла диэлектрических потерь в конденсаторных установках')
disp(mat2str(tade,5))
disp('Активные мощности потерь в линиях, Вт')
disp(mat2str(real(Sl),5))
disp('Реактивные мощности потерь в линиях, ВАр')
disp(mat2str(imag(Sl),5))
disp(['Суммарная активная мощность потерь во всех линиях ',...
      num2str(real(Sa),'%0.7g'),' Вт'])
disp(['Суммарная реактивная мощность потерь во всех линиях ',...
      num2str(imag(Sa),'%0.7g'),' ВАр'])
disp('Реактивные мощности, генерируемые конденсаторными установками, кВАр')
disp(mat2str(Qcond,5))
disp(['Суммарная реактивная мощность всех КУ ',...
      num2str(sum(Qcond),'%0.7g'),' кВАр'])
disp('Активные мощности потерь в КУ, Вт')
disp(mat2str(Pcond*1000,5))
disp(['Суммарная активная мощность всех КУ ',...
      num2str(sum(Pcond)*1000,'%0.7g'),' Вт'])
disp(['Суммарная потеря активной мощности ',...
      num2str(sum(Pcond)*1000+real(Sa),'%0.7g'),' Вт'])
disp('Активные мощности потерь в линиях без компенсации РМ, Вт')
disp(mat2str(real(Sbl),5))
disp(['Суммарная активная мощность потерь во всех линиях без КРМ ',...
      num2str(real(Sba),'%0.7g'),' Вт'])
disp(['Суммарная реактивная мощность потерь во всех линиях без КРМ ',...
      num2str(imag(Sba),'%0.7g'),' ВАр'])

```

Анализ потерь активной и реактивной мощности в однофазном трансформаторе

Имеется однофазный силовой трансформатор, для которого известны каталожные данные: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, первичное (высшее) напряжение (ВН) U_1 , вторичное (низшее) напряжение (НН) U_2 , активная мощность потерь на холостом ходу $P_{\text{хх}}$, активная мощность потерь в опыте короткого замыкания $P_{\text{кз}}$, напряжение короткого замыкания в процентах от номинального $U_{\text{кз}\%}$, ток холостого тока в процентах от номинального $I_{\text{х}\%}$.

Требуется по известным каталожным данным вычислить матрицу импедансов обмоток, а также зависимость потерь активной и реактивной мощности от коэффициента загрузки трансформатора k_3 , если он запитан со стороны ВН номинальным напряжением. Расчёт потерь провести с использованием матрицы импедансов обмоток и с применением эмпирической формулы:

$$P_{\Pi} = P_{XX} + k_3^2 \cdot P_{K3}, \quad Q_{\Pi} = Q_{XX} + k_3^2 \cdot S_{K3}, \quad (1)$$

где P_{Π} , Q_{Π} – потери активной и реактивной мощности в трансформаторе при работе под нагрузкой, $k_3 = S_H/S_{НОМ}$, S_H – полная мощность нагрузки, подключенной со стороны НН, $Q_{XX} = (S_{XX}^2 - P_{XX}^2)^{1/2}$, $S_{XX} = S_H \cdot I_{X\%}/100$, $S_{K3} = S_H \cdot U_{K3\%}/100$. Требуется сравнить результаты расчёта потерь двумя указанными способами. При расчёте потерь по формуле (1) в качестве коэффициента k_3 принять фактический коэффициент загрузки с учётом потери напряжения НН и предполагаемый коэффициент загрузки без учёта потери напряжения. По результатам расчётов требуется построить следующие графики: зависимости потерь активной и реактивной мощности от фактического коэффициента загрузки; зависимости относительных отклонений потерь, рассчитанных по (1), от потерь, рассчитанных по матрице импедансов обмоток; зависимости напряжения НН от коэффициента загрузки. Эти графики построить при значениях коэффициента мощности нагрузки, равных {1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0}, если нагрузка активно-индуктивная и активно-ёмкостная.

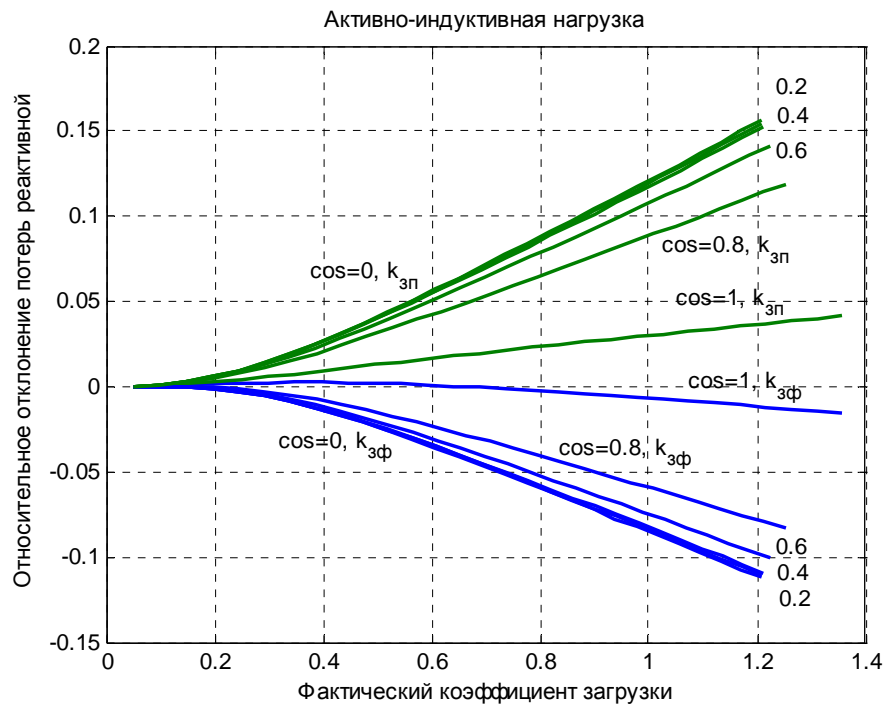
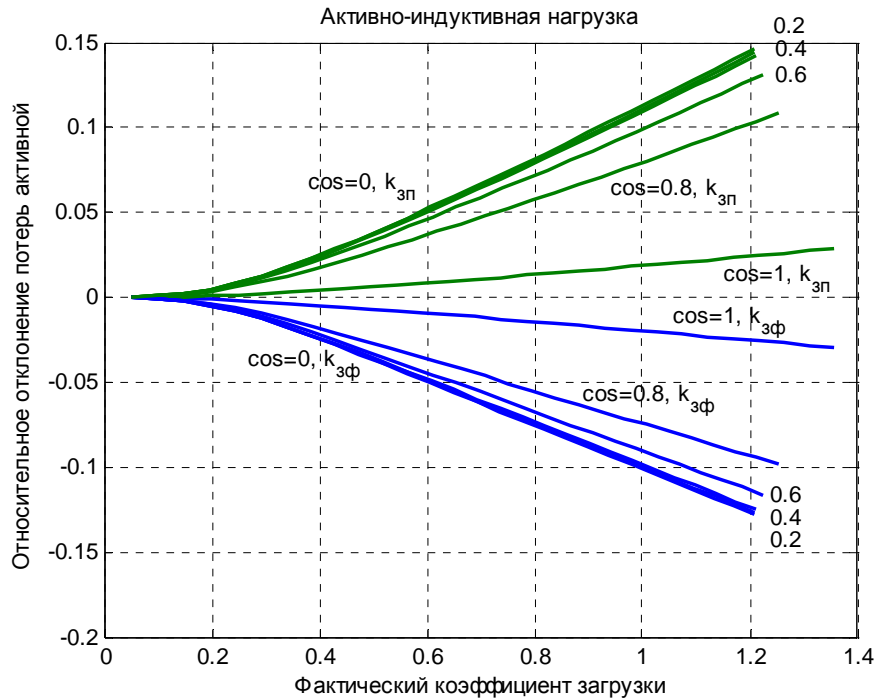
Примерный вид вычислительного сценария:

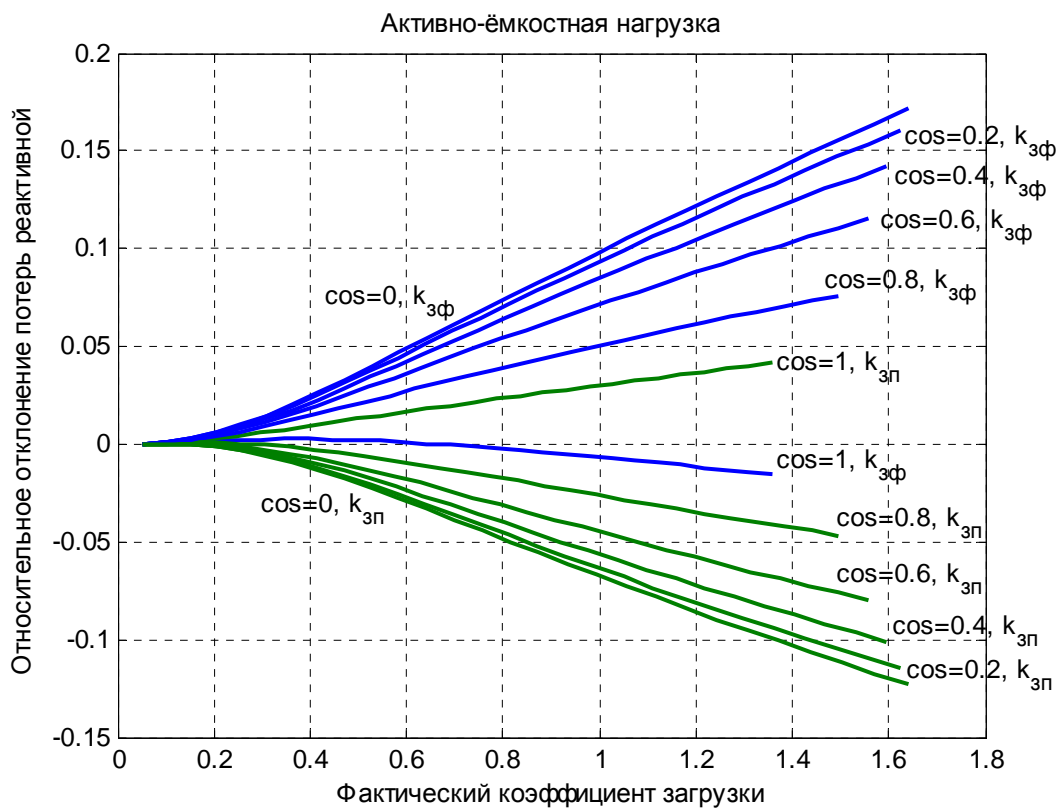
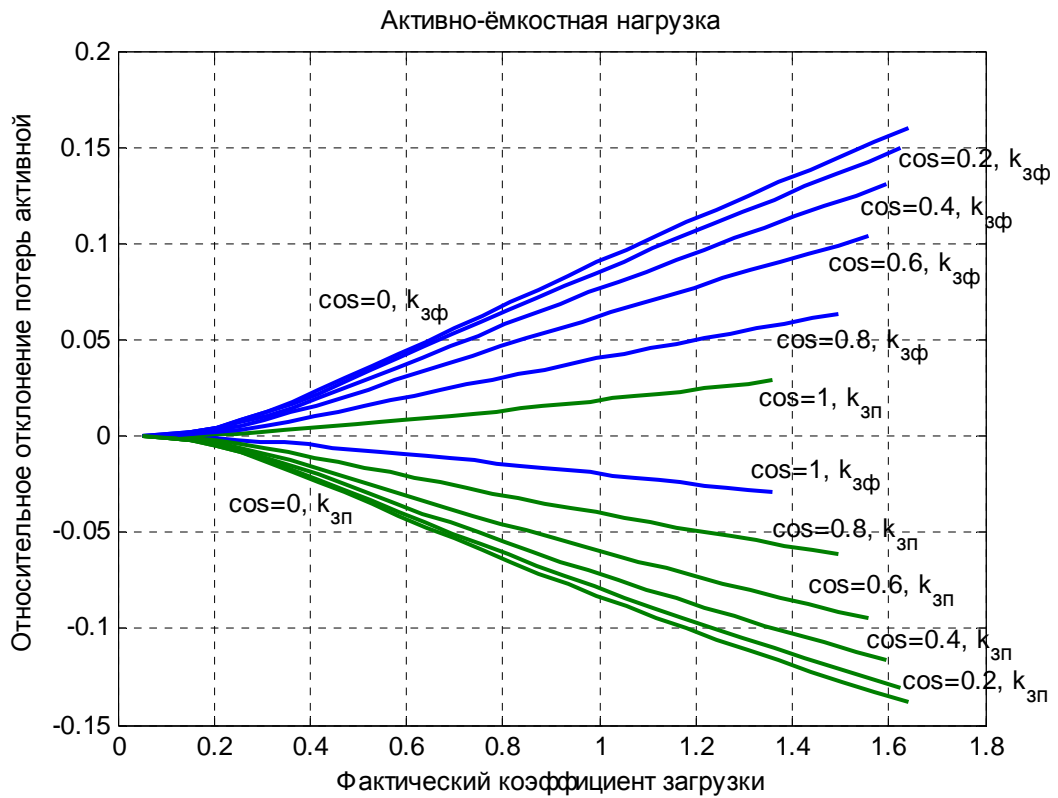
```
% ana_trans_lph - анализ работы однофазного трансформатора
% Пусть это ОМЗ-1600/10/0.4
Snom=1600000; % Номинальная мощность, ВА
Phh=2100; % Акт мощность потерь на хх
Pk=14800; % Акт мощность потерь при кз
U1kp=5.5; % Напряжение короткого замыкания в процентах
Ihhp=1.15; % Ток холостого хода в процентах
U1=10000; % Напряжение ВН, В
U2=400; % Напряжение НН, В
cofin=0.0; % Коэффициент мощности нагрузки
sifin=sqrt(1-cofin^2); % Коэффициент реактивной мощности нагрузки
Zt=z_trans_lph(Snom,U1,U2,Ihhp,Phh,U1kp,Pk);
V=[1 0 1 0; 0 1 0 -1]; % Матрица главных контуров цепи
% ветвь 1 - источник ЭДС, подключённый к первичным зажимам
% ветвь 2 - нагрузка, подключённая к вторичным зажимам
% ветвь 3 - первичная обмотка
% ветвь 4 - вторичная обмотка
Zn=U2^2/Snom*complex(cofin,sifin); % Импеданс нагрузки при kzp=1
kzp=0.05:0.05:1.4; % массив предполагаемых коэффициентов загрузки
n=length(kzp);
Ika=complex(zeros(2,n)); % Массив токов ВН и НН при разных коэф-ах загрузки
SE=complex(zeros(1,n)); % Массив компл мощностей источника при разных kzp
Sn=complex(zeros(1,n)); % Массив компл мощностей нагрузки при разных kzp
Un=complex(zeros(1,n)); % Массив компл напряж-ий нагрузки при разных kzp
kz=zeros(1,n); % Массив значений фактического коэф-а загрузки тр-ра
Pp=zeros(1,n); % Массив активных мощностей потерь при разных kz
Qp=zeros(1,n); % Массив реактивных мощностей потерь при разных kz
Pt=zeros(1,n); % Массив активных мощностей потерь при разных kzp
Qt=zeros(1,n); % Массив реактивных мощностей потерь при разных kzp
for ii=1:n
    Znk=Zn/kzp(ii);
    Zv=[diag([0,Znk]),zeros(2,2);zeros(2,2),Zt];
    Ev=[10000;0;0;0]; % Столбец ЭДС ветвей
    Zk=V*Zv*V.'; % Матрица контурных импедансов
    Ek=V*Ev; % Столбец контурных ЭДС
    Ik=Zk\Ek; % Столбец контурных токов
    Ika(:,ii)=Ik;
    SE(ii)=Ek(1)*conj(Ik(1)); % Компл мощность, генерируемая источником ЭДС
    Un(ii)=Znk*Ika(2); % Комплексное напряжение на нагрузке, В
    Sn(ii)=Un(ii)*conj(Ika(2)); % Компл мощность, потребляемая нагрузкой
    kz(ii)=abs(Sn(ii))/abs(Snom); % фактический коэффициент загрузки тр-ра
```

```

Pp(ii)=Phh+kz(ii)^2*Pk; % Активная мощность потерь в тр-ре по эмпири ф-ле
Qp(ii)=sqrt((Snom*Ihhp/100)^2-Phh^2)+kz(ii)^2*Snom*Ulkp/100; %Reactive ...
Pt(ii)=Phh+kzp(ii)^2*Pk; % Активная мощность потерь в тр-ре по эмпири ф-ле
Qt(ii)=sqrt((Snom*Ihhp/100)^2-Phh^2)+kzp(ii)^2*Snom*Ulkp/100;%Reactive ...
end
Sp=SE-Sn; % Комплексная мощность потерь в трансформаторе при разных kzp
Sd=complex(Pp,Qp)-Sp; % Расхождение потерь, рассчитанных по-разному
Sr=complex(Pt,Qt)-Sp; % Расхождение потерь, рассчитанных по-разному

```



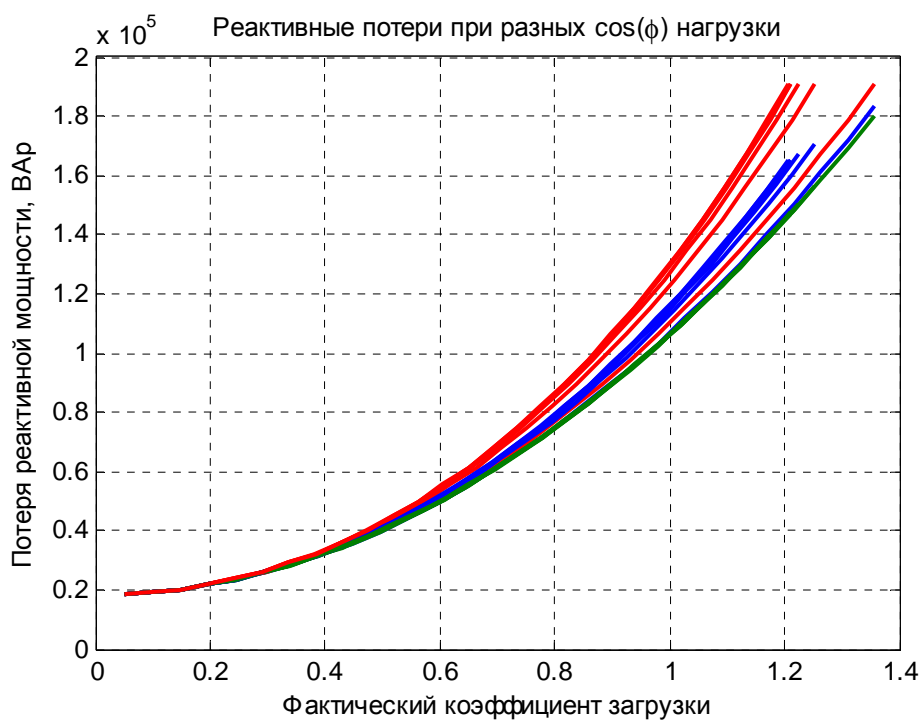
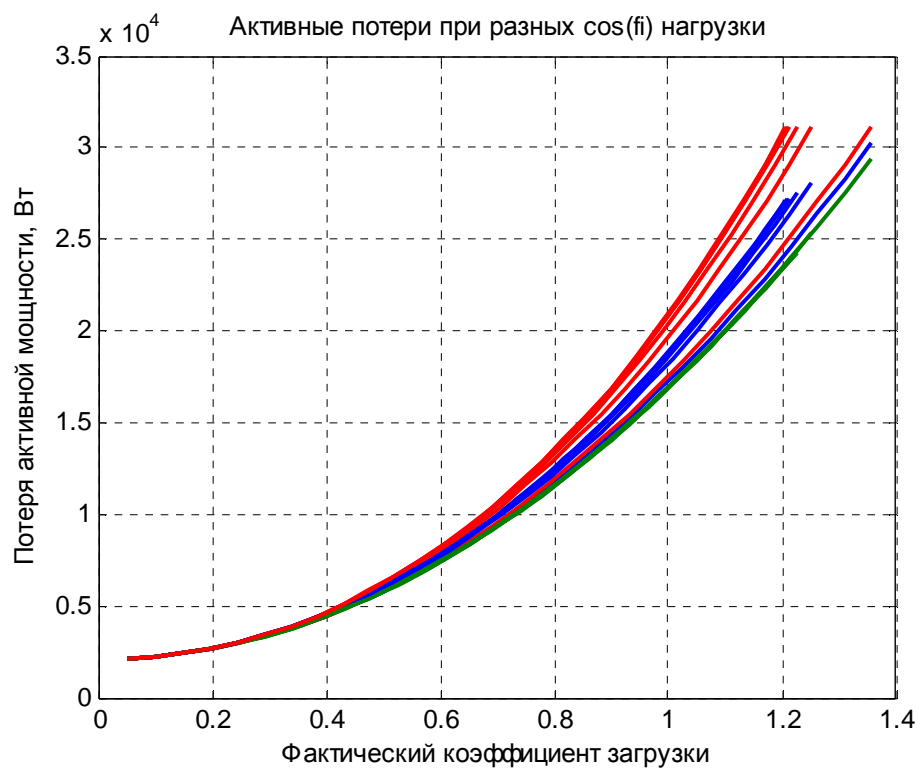


Пары кривых построены операторами:

`plot(kz,real([Sd;Sr])./real([Sp;Sp]),'linewidth',2), grid on`

`plot(kz,imag([Sd;Sr])./imag([Sp;Sp]),'linewidth',2), grid on`

Следующие графики построены для активно-индуктивной нагрузки.

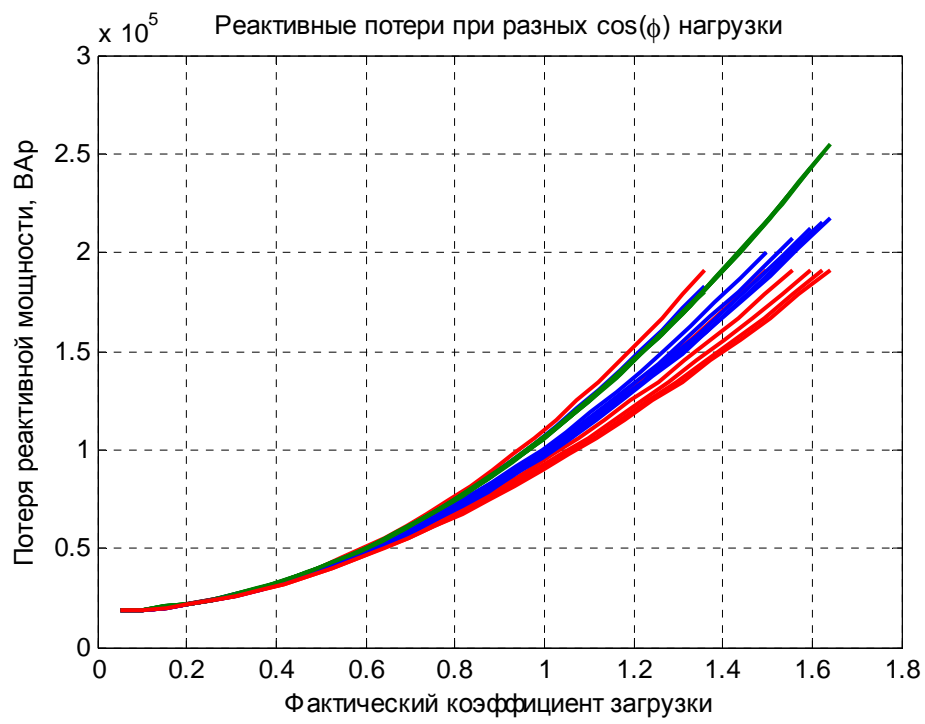
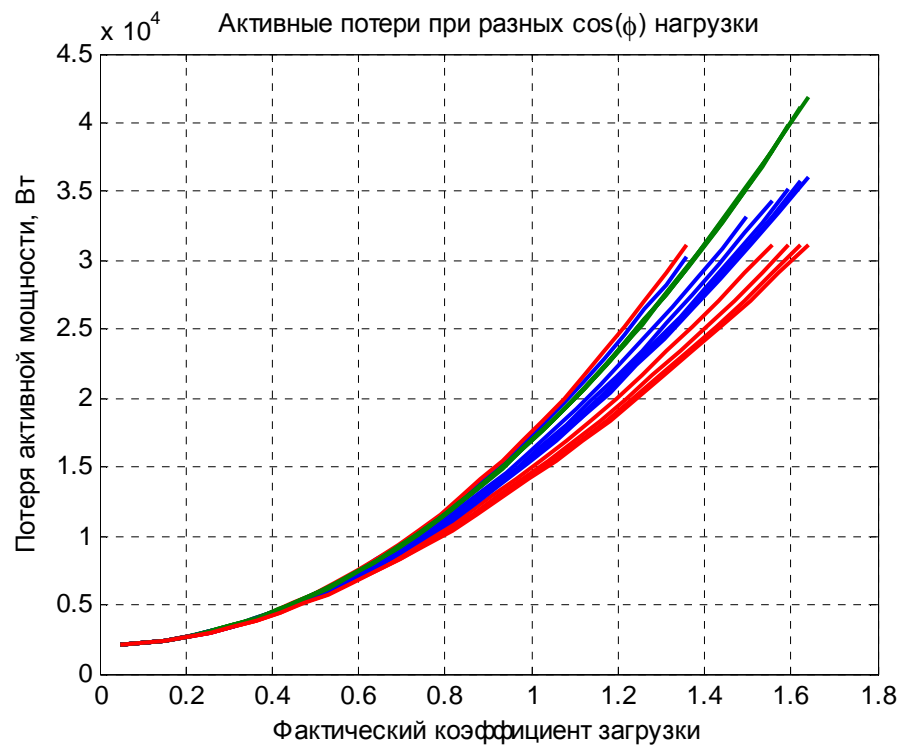


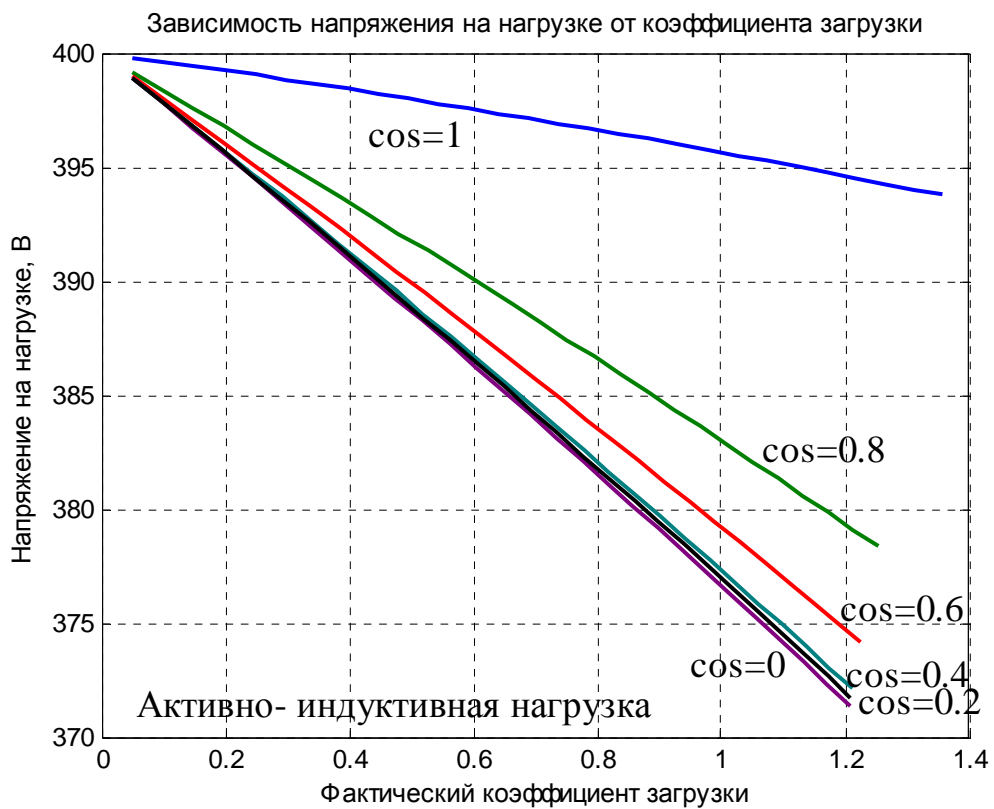
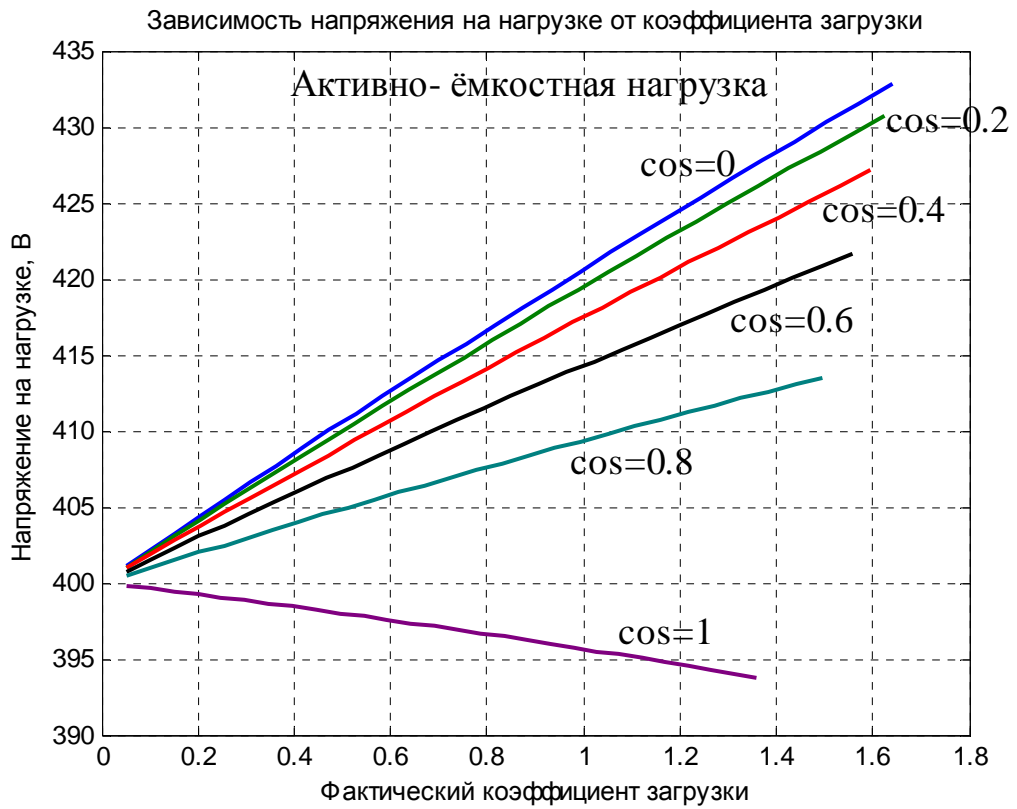
Пары кривых построены операторами:

```
plot(kz,[real(Sp);Pp;Pt],'linewidth',2), grid on
```

```
plot(kz,[imag(Sp);Qp;Qt],'linewidth',2), grid on
```

Следующие графики построены для активно-ёмкостной нагрузки.





Кривые построены оператором:
`plot(kz,abs(Un),'linewidth',2), grid on`