МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Р.Ю. Ткачев

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ** **ОСНОВЫ** **ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ** **ЦЕПИ.**

Учебное пособие

**2002**

Трехфазные цепи

синусоидального тока

Рабочая программа

Общие положения

Основные соотношения

Типовые примеры

Расчет трехфазной цепи при соединении звездой

Расчет трехфазной цепи при соединении треугольником

**Трехфазные** **цепи** **синусоидального** **тока**

***1*** ***Рабочая*** ***программа***

1. Понятие о трехфазных источниках питания и о многофазных це-

пях. Получение трехфазной системы ЭДС. Временная и вектор-

ная диаграмма трехфазной системы ЭДС. Преимущества трех-

фазных систем.

2. Трехфазная цепь. Основные схемы соединения трехфазных це-

пей, определение линейных и фазных величин. Соотношения ме-

жду линейными и фазными напряжениями и токами (для генера-

тора и нагрузки).

3. Расчет несимметричных трехфазных цепей, включенных по схеме

звезда-звезда с нулевым проводом; по схеме звезда-звезда без ну-

левого провода.

4. Расчет несимметричных трехфазных цепей, включенных по схеме

треугольник.

5. Расчет симметричных трехфазных цепей.

6. Аномальные случаи несимметрии: обрыв фаз и проводов, корот-

кое замыкание фаз. Роль нейтрального провода.

7. Активная, реактивная и полная мощности в трехфазных цепях.

Измерения активной и реактивной мощностей в трехфазных це-

пях.

8. Вращающее магнитное поле. Принципы действия асинхронного и

синхронного двигателей.

9. Понятие о методе симметричных составляющих. Симметричные

составляющие несимметричной трехфазной системы величин.

Сопротивления фазы различных приемников токам прямой, об-

ратной и нулевой последовательности.

10.Расчет трехфазных цепей методом симметричных составляющих.

Фильтры симметричных составляющих.

***Общие*** ***положения***

Генерирование и потребление электрической энергии в

большей степени осуществляется с использованием трехфазных сис-

тем ЭДС, напряжений и токов. С учетом этого изучения процессов,

происходящих в трехфазных цепях, а также овладение методами

расчета этих цепей имеет большое значение для бакалавра – элек-

трика.

При изучении трехфазных электрических цепей необходимо,

в первую очередь, уяснить понятие трехфазной цепи как разновид-

ности многофазной электрической цепи, иметь представление о

временной и векторной формах записи трехфазной системы ЭДС и

их получение.

Прежде чем рассматривать методы расчета трехфазных элек-

трических цепей, необходимо разобраться со схемами соединений

обмоток трехфазных источников и трехфазных потребителей, уяс-

нить понятия фазы, линейных и фазных напряжений и токов, линей-

ных и нейтрального проводов, усвоить соотношение между линей-

ными и фазными токами и напряжениями при соединении по схеме

“звезда” и по схеме “треугольник”. Необходимо также четко разли-

чать симметричные и несимметричные электрические цепи и их

особенности, четко представлять назначение нейтрального провода.

Уяснив основополагающие моменты, необходимо переходить к изу-

чению методов расчета трехфазных электрических цепей.

Следует отметить, что для расчета трехфазных электрических

цепей можно использовать применение комплексных чисел любых

из методов расчета сложных электрических цепей переменного и

однофазного синусоидального токов. Однако универсальным мето-

дом расчета трехфазной электрической цепи по схеме “звезда-

звезда” как с нейтральным проводом, так и без него является метод

узлового напряжения. Этот метод можно применять как для симмет-

ричных электрических цепей, так и для несимметричных. При этом

следует четко усвоить, что в общем случае трехфазную электриче-

скую цепь по схеме “звезда-звезда” можно рассматривать как элек-

трическую цепь с четырьмя параллельно включенными ветвями, в

трех из которых действуют симметричная трехфазная система ЭДС,

а четвертая ветвь представляет собой нейтральный провод, сопро-

тивление которого может быть как равным бесконечности (при от-

сутствии), так и равным нулю (при соединении нейтрали генератора

и нейтрали потребителя).

Расчет трехфазных электрических цепей, в которых потреби-

тель соединен по схеме “треугольник” в общем случае (при нала-

чии сопротивлений линейных проводов), выполняется также с ис-

пользованием метода двух узлов. Для этого необходимо уметь пре-

образовать соединение “треугольник” в эквивалентное соединение

“звездой”. Кроме того, необходимо уяснить, что для расчета трех-

фазных электрических цепей, нагрузка в которых соединена “тре-

угольником”, целесообразно использовать закон Ома и законы

Кирхгофа (например, при сопротивлении линейных проводов, близ-

ком к нулю).

В процессе изучения методов расчета трехфазных цепей не-

обходимо четко представлять, что симметричные цепи являются ча-

стным случаем несимметричных электрических цепей, а из этого

вытекают некоторые особенности, которые позволяют значительно

упростить расчет: можно выполнять расчет напряжений и токов

только для одной фазы, имея в виду, что в других фазах токи и на-

пряжения такие же по величине и отличаются только сдвигом на уг-

лы ±120°.

При особых случаях несимметрии трехфазных цепей: (обрыв

фаз и проводов, короткое замыкание фазы) следует помнить, что

расчет выполняется аналогично рассмотренному выше, с предвари-

тельным анализом и необходимыми преоббразованиями.

Большое значение при изучении трехфазных электрических

цепей имеют вопросы определения активной, реактивной и полной

мощностей. Необходимо уяснить схемы измерения активной и реак-

тивной мощностей в симметричных и несимметричных трехфазных

электрических цепях. При этом необходимо помнить, что показание

ваттметра равно действительной части от произведения комплексно-

го действующего значения тока при установке выбора положитель-

ных направлений напряжения и тока от генераторных зажимов об-

моток ваттметра к негенераторным.

Получение вращающегося магнитного поля с помощью трех-

фазной системы токов является одним из преимуществ трехфазных

цепей. Необходимо четко представлять процесс получения вращаю-

щегося магнитного поля, знать условия, при котором оно возникает,

а также принципы действия асинхронного и синхронного двигате-

лей.

Следует знать и помнить, что в трехфазных цепях, содержа-

щих асинхронные и синхронные машины, а также трехфазные

трансформаторы, сопротивление фазы указанных элементов стано-

вится неопределенным, зависящим от степени несимметрии напря-

жений и токов. В данном случае метод двух узлов применить нельзя,

и поэтому в расчете используют метод симметричных составляю-

щих. Суть этого метода заключается в том, что любую несиммет-

ричную трехфазную систему ЭДС, напряжений, токов можно разло-

жить на три симметричные системы, составляющие прямой, обрат-

ной и нулевой последовательности. В дальнейшем расчет произво-

дится для каждой симметричной составляющей (известными мето-

дами), а результат находят путем наложения трех симметричных

режимов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

***Основные*** ***соотношения***

**1 Мгновенное значение и комплексы трехфазной симметричной**

**системы напряжений:**

uA =Um sin(ωt); UA =U;

uB=Um sin(ωt-120°); UB=Ue-j120°; uC=Um sin(ωt+120); UC =Uej120°.

**2 Соотношения между линейными и фазными напряжениями и**

**токами.** При соединении фаз звездой (общий случай):

UAB UA - UB;UBC UB -UC;UCA UC -UA;

а фазные токи одновременно являются и линейными токами соот-

ветственно.

Для симметричной нагрузки между линейными и фазными на-

пряжениями и токами сущетвуют следующие зависимости:

Uл = 3Uф; Iл =Iф.

При соединении фаз треугольником (общий случай):

IA =IAB-IBC; IB=IBC-IAB; IC=ICA-IBC ,

а линейные напряжения являются соответственно фазными напря-

жениями.

В случае симметричной нагрузки между линейными и фазны-

ми напряжениями и токами имеют следующие зависимости:

Uл =Uф; Iл = 3Iф.

**3 Смещение нейтрали** определяется выражением:

UAyA +UByB+UCyC N yA +yB+yC +yN

U = ,

UA, UB, UC – фазные напряжения генератора;

yA, yB, yC, yN – проводимости отдельных фаз цепи и нейтрального

(нулевого) провода.

**4 Токи в фазах и нейтральном проводе**:

I A=(UA -UN)yA; I B=(UB-UN)yB; I C=(UC-UN )yC; IN =UNyN =I A+I B+I C .

& & &

**5 Мощности в трехфазных цепях** определяются выражениями:

а) активная мощность –

P=PA +P +P +PN =Re(UA I A+UB I B+UC I C+UN IN);

ˆ ˆ ˆ ˆ

B C

б) реактивная мощность –

Q=QA +QB+QC+QN =Im(UA I A+UB I B+UC I C+UN I N);

ˆ ˆ ˆ ˆ

в) полная мощность –

S= P2+Q2 ;

S=SA +SB+SC+SN =UA I A+UB I B+UC I C+UN I N.

ˆ ˆ ˆ ˆ

**6 Разложение несимметричной системы** A, B, C **(ЭДС, напря-**

**жения, токи) на системы прямой, обратной и нулевой после-**

**довательности**:

A1=3A+aB+a2C; B1=a2A1; C1=aA1; A2=3A+a2B+aC; B2 =aA2; C2 =a2A2;

1

1

A0 =B0 =C0=3A+B+C.

1

***Типовые*** ***примеры***

**Расчет** **трехфазной** **цепи** **при** **соединении** **звездой**

К симметричному трехфазному генератору с фазной ЭДС E=220 B и с внутренним сопротивлением фазы z0=0.5+jОм под-ключена несимметричная нагрузка, соединенная в звезду с нулевым

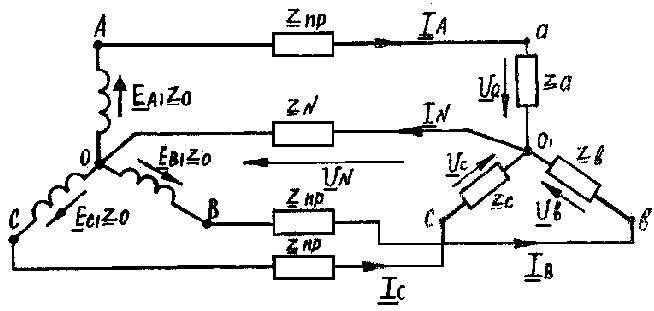
проводом (рис. 3.1(а)). Сопротивления фаз нагрузки – zA =6+j8Ом, zB=5-j5Ом, zC =8 Ом. Сопротивление каждого провода линии – znp =0.3+j0.4Ом, а сопротивление нейтрального провода –

zN =0.5 Ом. Определить токи и напряжения на каждой фазе нагрузки

и генератора, а также активную, реактивную и полную мощности

нагрузки и генератора при наличии нейтрального провода и при его

обрыве. Построить векторную диаграмму для каждого случая.



*Рисунок* *3.1а*

Решение

1. Записываем фазные ЭДС генератора в комплексной форме:

EA =Eф=220 B; EB=220e-j120B; EC=220ej120B;

& & &

2. Определяем комплексные проводимости фаз трехфазной цепи:

yA = zA +z0 +znp =6.8+j9.4=0.0862e-j54.1=0.050-j0.070;

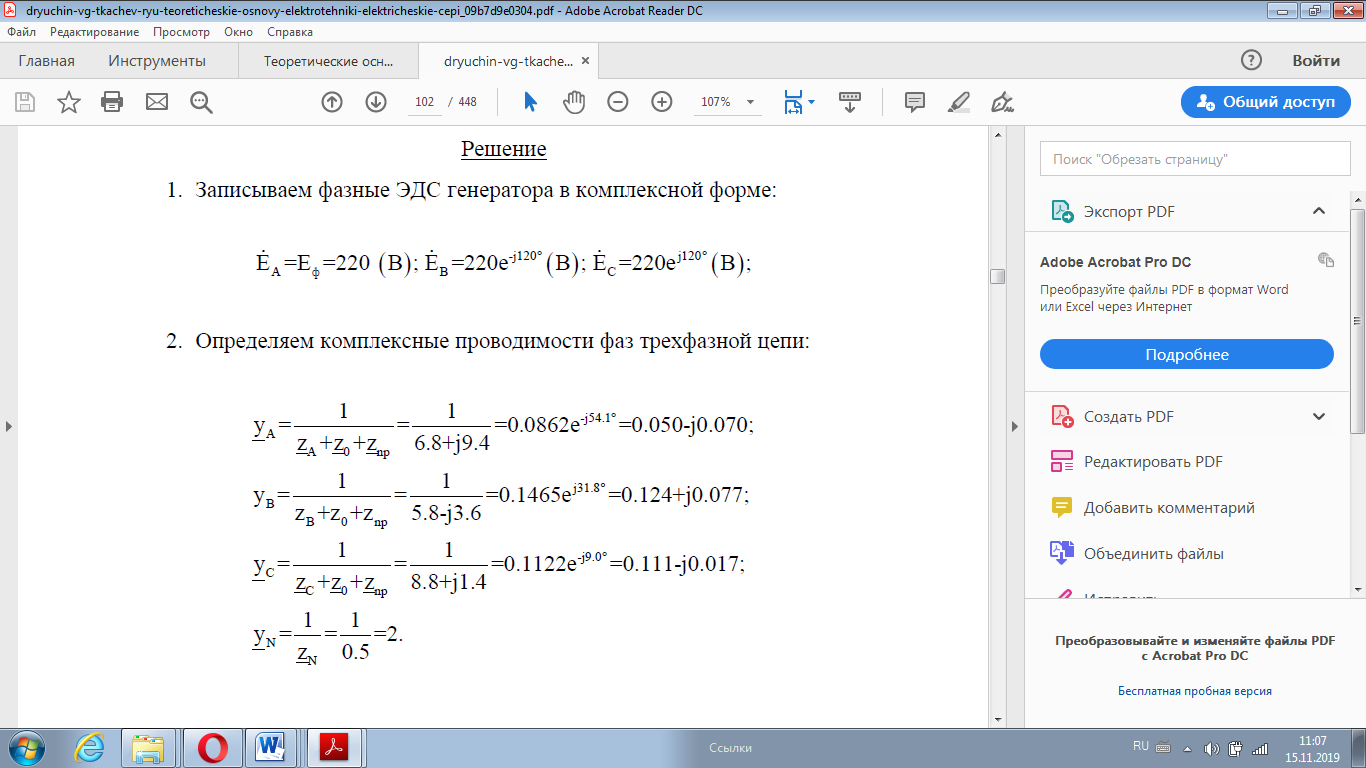
1 1

yB= zB+z0+znp =5.8-j3.6=0.1465ej31.8=0.124+j0.077;

1 1

yC= zC +z0+znp =8.8+j1.4=0.1122e-j9.0=0.111-j0.017;

1 1



При наличии нейтрального провода

3. Определяем напряжение смещения нейтрали:

EAyA +EByB+ECyC N yA +yB+yC +yN

U = =

2200.0862e-j54.1 220ej1200.1465ej31.8 220ej1200.1122ej9 0.050j0.0700.124j0.0770.111j0.0172

= 

3.286 j24.526 10.830ej82.12 1.48j10.72.

2.286 j0.010



4. Находим токи:

I AEA UN yA 2201.48j10.720.0862ej54.1 18.86e51.3 11.79j14.72;

I BEB UN yB 110j190.521.48j10.720.1465ej91.8 30.99ej90 j3099;

I CEC UN yC 110j190.521.48j10.720.1122ej9 25.81ej109.98 8.82j24.25;

I NUNyN 10.83ej82.122 21.66ej82.12 2.97 j21.45;

Проверка показывает, что I AI BI CI N0;

5. Напряжение на фазах нагрузки:

Ua01 I AzA 18.86ej51.3 6j8188.60ej1.83 ; Ub01 I BzB 30.99ej90 5j5219.13ej139 ;

Uc01 I CzC 25.81ej109.988206.48ej109.98 .

6. Определяем напряжение на каждой фазе генератора:

UA0 EA I Az0 22018.86ej51.3 0.5j199.43ej1.27 ;

UB0 EB I Bz0 110j190.5230.99ej90 0.5j224.74ej128.85 ; UC0 EC I Cz0 110j190.5225.81ej108.98 0.5j203.66ej113.56 .

При обрыве нейтрального провода

7. Напряжение смещения нейтрали:

UN = E yA +yB+yC +yCyC = 0.285ejj82.37 86.68ej80.33 14.56j85.45.

N

A A B B

y +E y +E

2.04

24.745e

8. Определяем токи:

IA EA UN yA 22014.56j85.450.0862ej54.1 19.18ej31.3 16.35j10.02;



IB EB UN yB 110j190.5214.56j85.450.1465ej91.8 23.73ej108.05 7.35j22.56;



IC EC UN yC 110j190.5214.56j85.450.1122ej9 =33.97ej105.3 8.96j32.77;





IN UNyN 10.83ej82.122 21.66ej82.12 2.97j21.45.

9. Напряжение на фазах нагрузки:

Ua01 IAzA 19.18ej31.5 6j8191.80ej21.6 ; Ub01 IBzB 23.73ej108.05 5j5167.77ej153.05 ; Uc01 ICzC 33.93ej105.308 271.44ej105.30 .

 

 

 

10.Напряжение на фазах генератора:

UA0 EA IAz0 22019.18ej31.51.12ej63.4 202.12ej3.2 ;

 

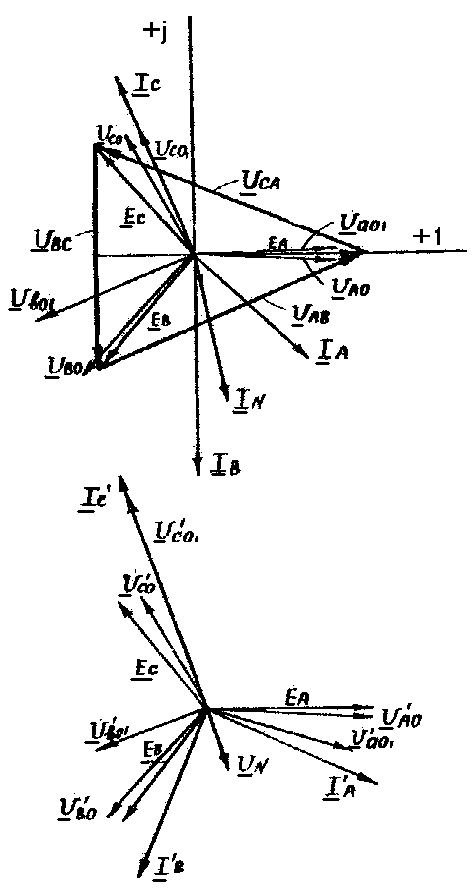
UB0 EB IBz0 110j190.5223.73ej108.051.12ej63.4 214.83ej126.86 ; UC0 EC ICz0 110j190.5233.97ej108.981.12ej63.4 197.00ej111.7 .

 

 

Векторные диаграммы для обоих случаев приведены на рис.

3.1(б-в).

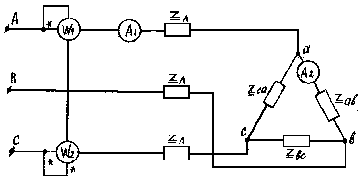


**2** **Расчет** **трехфазной** **цепи** **при** **соединении** **треугольником** Определить показания приборов электродинамической системы,

включенных в цепь (рис. 3.2(а)), если линейное напряжение симмет-

ричного генератора Uл=380 В, сопротивления фаз приемника zab 5Ом, zbc 4j3Ом, zca 4j3Ом, сопротивление проводов линии передачи zл 0.5j0.5Ом. Построить векторную диаграмму

цепи. Сопротивлением фаз генератора пренебречь.



Решение

1. Заменяем треугольник сопротивлений потребителя эквивалент-

ной звездой:

za zab zbc zca 54j34j3 1.54j1.15Ом; zb zab zbc zca 54j34j3 1.54j1.15Ом; zc zab zbc zca 54j34j3 1.92Ом.

 

5 4 j3



 

5 4 j3



  

4 j3 4 j3

 

ab bc

z z



bc ca

z z



ab ca

z z



2. Записываем фазные напряжения генератора:

UA Uф U3 220;

л

UB UAej120 110j190.5; UC UAej120 110j190.5;

3. Определяем проводимости фаз эквивалентной схемы:

yA zл za 0.5j0.51.54j1.15 0.467ej17.7 0.444j0.142;

1 1

yB zл zb 0.5j0.51.54j1.15 0.382ej39.0 0.296j0.240;

1 1

yC zл zc 0.5j0.51.92 0.404ej11.7 0.396j0.082.

1 1

4. Находим напряжение смещения нейтрали в эквивалентной схеме:

UAyA +UByB+UCyC N yA +yB+yC +yN

U = =

2200.467ej17.7 220ej1200.382ej39.0 220ej1200.404ej11.7 0.444j0.1420.296j0.2400.396j0.082



=

74.700ej104.66 18.91j72.27 .

5. Токи в фазах эквивалентной схемы:

IA UA UN yA 22018.91j72.270.467ej17.7 116.56ej0.9 116.54j1.83;

IB UB UN yB 110j190.5218.91j72.270.382ej39.0 106.24ej148.1 90.19j56.14;

IC UC UN yC 110j190.5218.91j72.270.404ej11.7 60.10ej115.6 25.96j54.2 .

Правильность расчета проверяется соотношением I AI BI CI N0 ,

что в действительности и имеет место:

116.54j1.8390.19j56.1425.954.20 .

6. Определяем фазные напряжения эквивалентной схемы:

Ua01 IAzA 116.56ej0.9 1.54j1.15223.8ej36 181.1j131.5; Ub01 IBzB 106.24ej148.1 1.54j1.15203.8ej111.3 73.9j189.9; Uc01 ICzC 60.10ej115.68115.40ej115.6 49.86j104.10 .

7. Находим линейные напряжения эквивалентной звезды, которые

для исходной схемы треугольник будут одновременно и линей-

ными, и фазными напряжениями:

Uab Ua01 Ub01 181.10j131.573.9j189.9 255.0j38.4 261.6ej12.9 ;

Ubc Ub01 Uc01 73.9j189.949.8j104.124.0j294.0 295.0ej94.6 ;

Uca Uc01 Ua01 49.8104.1181.1j131.5230.96j235.6 329.9ej134.4.

8. Вычисляем фазные токи исходной схемы:

I abUab 261.6ej12.9 52.32ej12.9 51.00j11.68; ab

z 5

I bcUbc 295.0ej94.6 59.00ej131.5 39.10j44.20; bc

z 4j3

I caUca 329.9ej134.4 65.98ej171.3 65.20j10.00. ca

z 4 j3



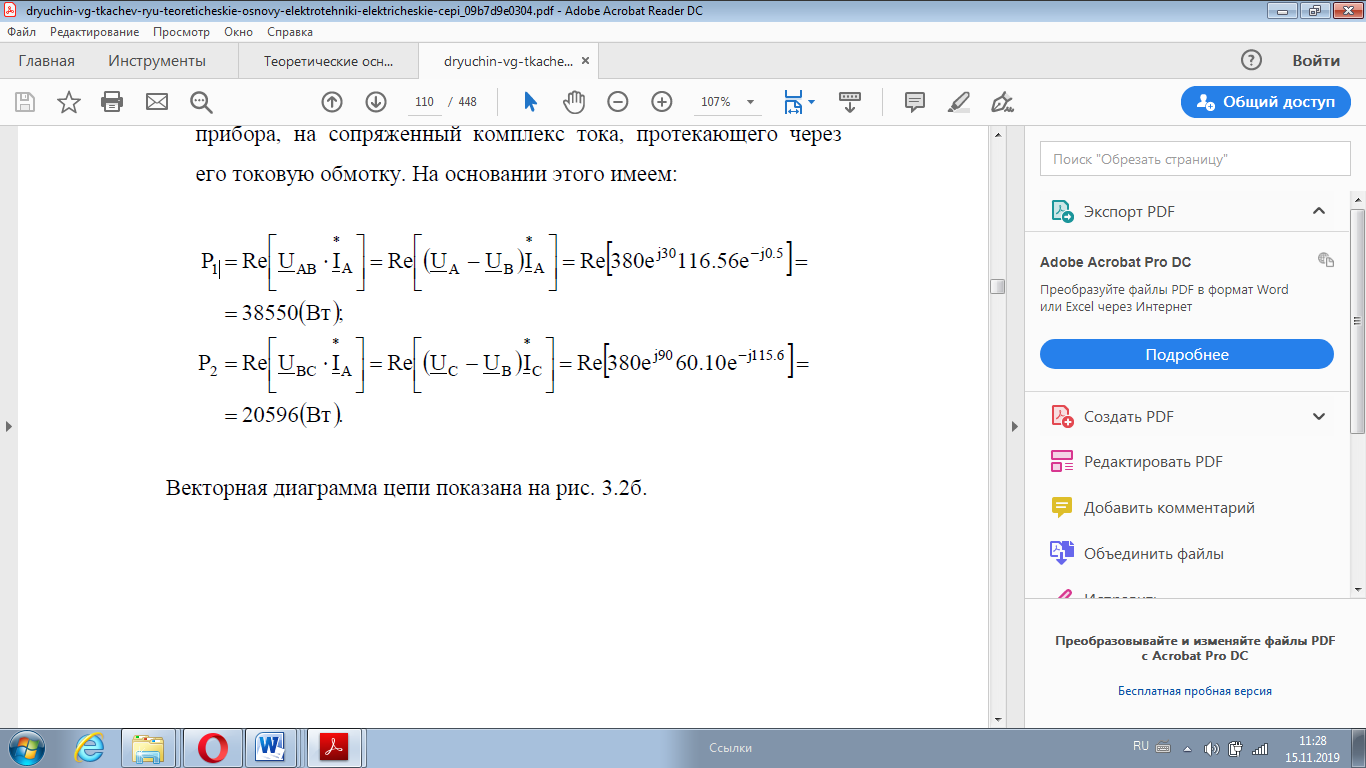
Проверка IAI abI ca51.00j11.6865.20j10.00116.20j1.68,

что свидетельствует о правильности расчета (имеется небольшая по-

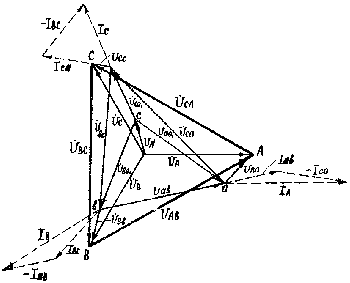
грешность вычислений).

На основании выполненного расчета амперметр A1 показывает 116.56 (A), A2 –52.32 (A).

9 Показание ваттметра равно вещественной части произведения комплекса напряжения, приложенного к обмотке напряжения прибора, на сопряженный комплекс тока, протекающего через его токовую обмотку. На основании этого имеем:



Векторная диаграмма цепи показана на рис. 3.2б.



*Рисунок* *3.2* *б*

Сначала на комплексной плоскости были построены векторы фаз-

ных и линейных напряжений источника, затем выполнено построе-

ние напряжения смещения нейтрали, фазных и линейных напряже-

ний на проводах линии. Векторы фазных токов построены из точек ,

там же показаны и линейные токи.