**Анализ токов и напряжений в произвольной сети.**

Для полноценного анализа работы алгоритмов защиты следует рассматривать произвольную сеть, характеризующуюся большим количеством источников питания и сложной структурой с кольцевыми связями. В такой сети нет единого аналитического выражения для расчета токов и напряжений, и даже для частных случаев получить его затруднительно. Для частичного решения этой проблемы целесообразно использовать метод наложения.

Идея метода наложения заключается в том, чтобы уравнять количество ветвей в электрической сети до повреждения и после.

* рассчитывается доаварийный режим. В место предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь с ЭДС, равной доаварийному напряжению *U*доав*F* в заданной точке. Как известно, если между точками сети, имеющими разность потенциалов *U*доав*F*, включить источник ЭДС, равный *U*доав*F* по величине и направлению, то токораспределение в сети не изменится (рис. 1*a*);
* рассчитывается послеаварийный режим. В ней ветвь КЗ представляет собой закоротку (рис. 1*б*);
* из уравнений по законам Кирхгофа для послеаварийной сети вычитаются почленно уравнения доаварийной сети. Это приводит к появлению так называемой чисто аварийной схемы, изображенной на рис. 1*в*.

Схема на рис. 1 принята, для простоты, однофазной. Как можно видеть, в чисто аварийной схеме всего одна ЭДС, что очень сильно облегчает анализ схемы.

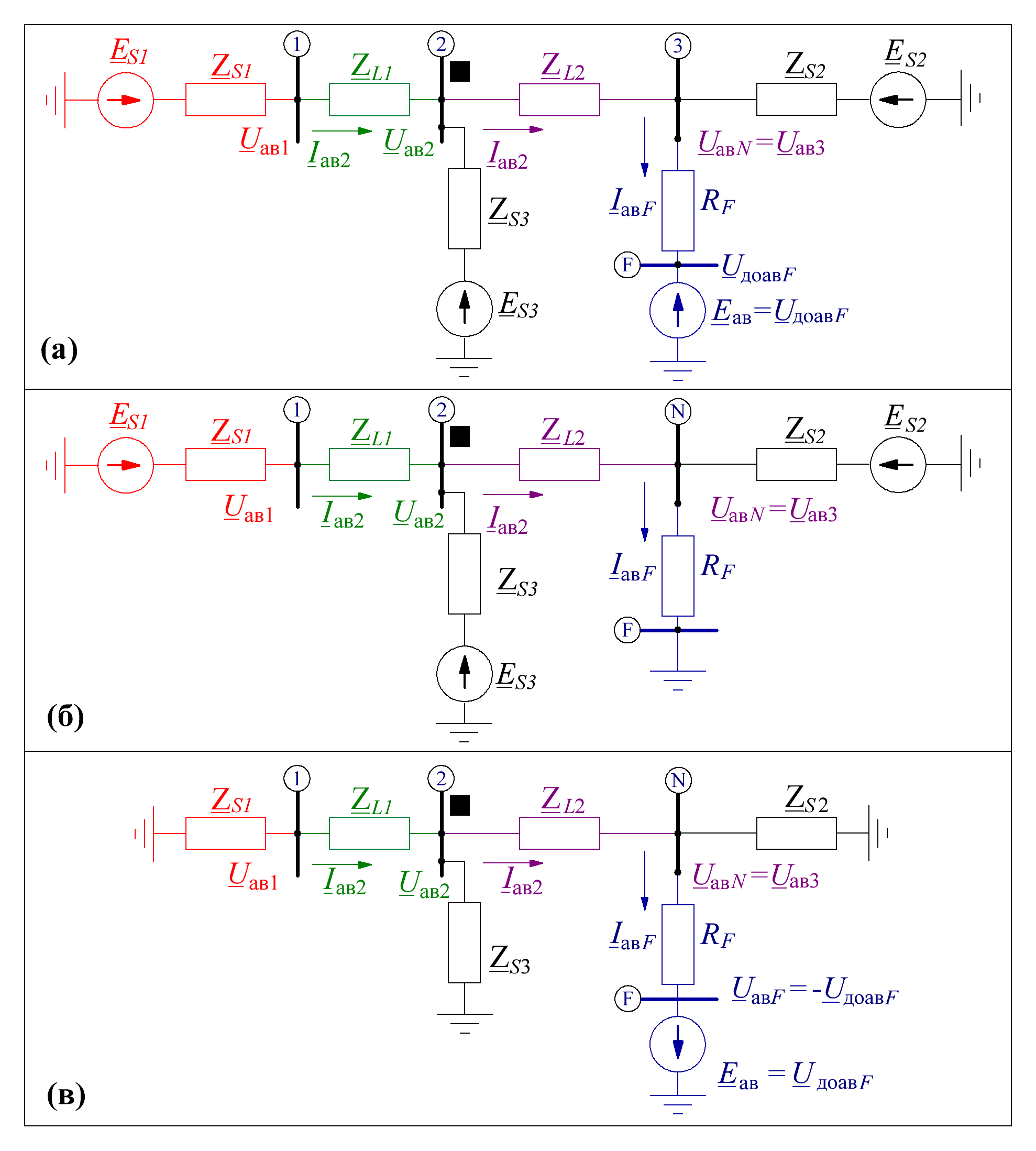


Рис. 1 — Метод наложения

**Принимаемые допущения:**

* угол у всех элементов *φ* = arctg(*X*/*R*) ≈ const (однородная сеть) [ 3];
* доаварийное напряжение в месте повреждения примерно равно *U*ном для данного класса напряжения (пунктирная окружность на рис. 2*а*, 3*а*).

**Анализ работы органов направления мощности (ОНМ) дистанционной защиты.**

Проанализируем работу органа направленности при помощи метода наложения. Очевидно, что информацию о КЗ следует извлекать из чисто аварийной схемы: в доаварийном режиме КЗ нет, в послеаварийном информация о КЗ искажена доаварийным режимом.

Угол α отмеряется от послеаварийного напряжения *U*2 к послеаварийному току *I*2. Угол *β* отмеряется от напряжения *U*ав2 к току *I*ав2.

С формальной точки зрения направление лучше всего определять по чисто аварийной схеме, т.к. у нее всего один источник. При arctg(*X*/*R*) ≈ const ее можно уподобить схеме на постоянном токе. Если источник находится впереди – ток течет в одну сторону, если сзади – в другую.

На рис. 2 показана векторная диаграмма при КЗ в прямом направлении. Положительное направление угла отсчитывается против часовой стрелки.

КЗ впереди:

* угол ***β*** между векторами чисто аварийного напряжения *U*ав2 и тока *I*ав2 ***отрицательный***. Он практически не меняется от режима к режиму.
* угол ***α*** между послеаварийным напряжением *U*2 и током *I*2 в случае замыкания впереди ***положительный*** и сильно зависит от режима.

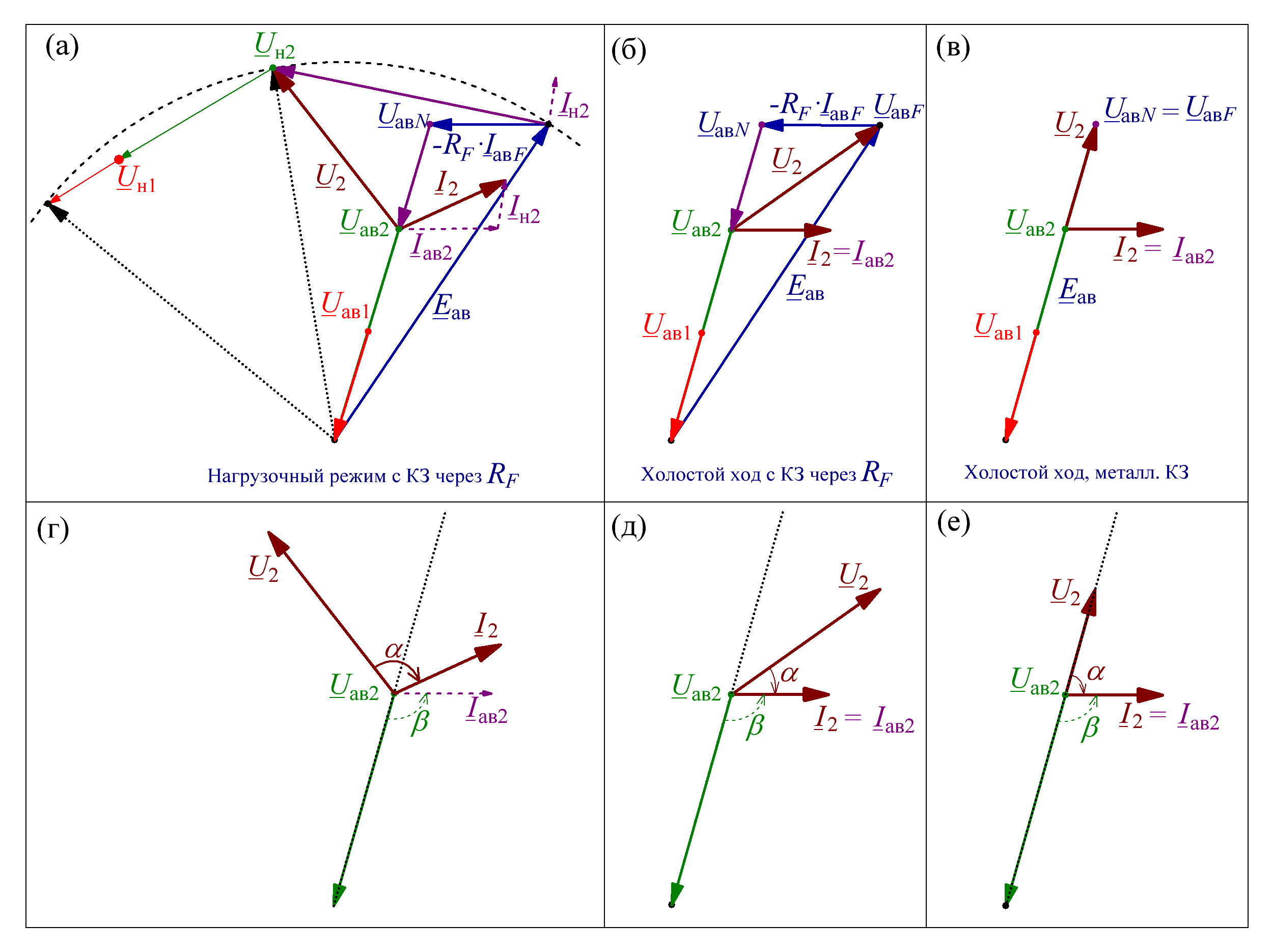


Рис. 2 — КЗ в прямом направлении для схемы рис. 1

На рис. 3 показана векторная диаграмма при КЗ в обратном направлении (для простоты показана только чисто аварийная схема). Можно видеть, что углы *α* и *β* ***поменяли знак***. Точно так же, как и ранее, угол *β* стабилен, угол *α* зависит от режима.

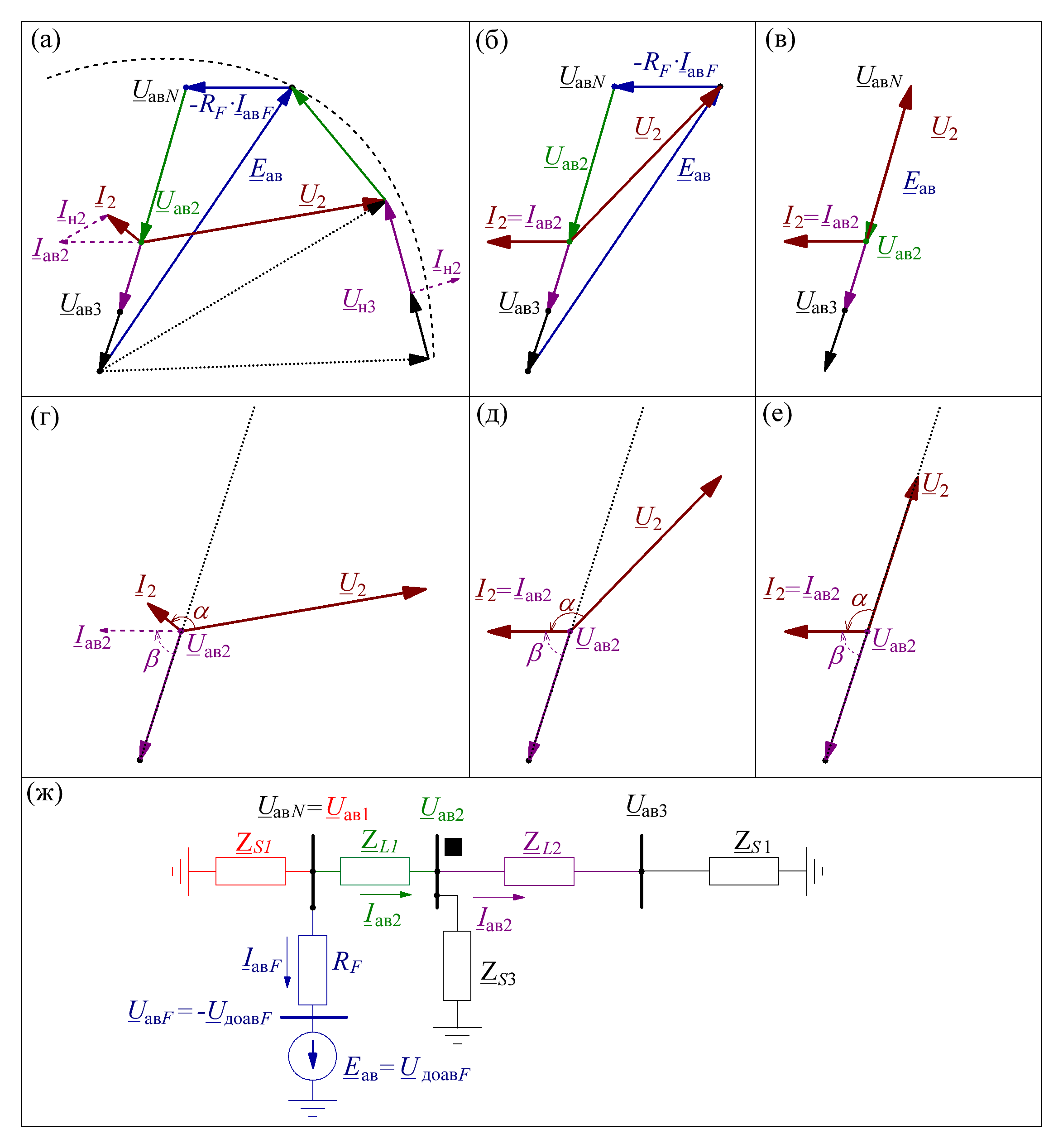


Рис. 3 — КЗ в прямом направлении

Из рис. 2,3, видно, что с точки зрения математики ***«направление на замыкание» – это угол***.

Если один из векторов, между которыми меряется угол, мал (сопоставим с погрешностю измерения), направление может определяться неправильно ***неправильно***. В литературе такой эффект называют *«мертвой зоной»*.

«Мертвая зона» реально возникает от напряжения: при коротком замыкании ток всегда есть.

Из рис. 2, 3 видно, что есть два основных способа определения направления: по чисто аварийной схеме (по углу *β*) и послеаварийной (по углу *α*).

**Чисто аварийный ОНМ по углу *β*.**

Отметим основные моменты:

1. Напряжение было бы надежнее всего брать в самом месте КЗ (*U*ав*N*), как самое большое по модулю. В реальности это невозможно, и приходится брать чисто аварийное напряжение в месте установки защиты (*U*ав2). В однородной схеме у них одинаковые фазы, и для расчета угла *β* без разницы, какое из них брать.
2. Устройством РЗА ток всегда измеряется в одном направлении (например, в линию). Смена направления на замыкание приведет к развороту фазы тока примерно на 180°.
3. Разность фаз между током и напряжением, соответствующая положительному направлению, определяется характером сети: активно-индуктивная или активно-емкостная. Из этого следует, что при наличии УПК с большой емкостью направление мощности может определиться неправильно.

Особенности такого способа:

* стабильность: угол *β*, в первом приближении, зависит только от того, впереди КЗ или сзади.
* нет «мертвой зоны» при близких КЗ (*U*ав2 → *U*ном);
* есть «мертвая зона» при удаленных КЗ (*U*ав2 →0)

Трехфазную чисто аварийную схему можно разложить на симметричные составляющие. Вся логика определения направления при этом сохраняется. Обычно на практике используют составляющие нулевой *U*02=*U*0ав2 и обратной *U*22=*U*2ав2 последовательности в составе ТЗНП и ТЗОП.

При трехфазных КЗ такой способ требует запоминания доаварийного режима, что делает его ненадежным, например при затяжных КЗ, когда доаварийных данных нет или они становятся неактуальными.

**Послеаварийный ОНМ по углу *α*.**

Такой способ дает логически идентичные результаты с ОНМ по углу *β* только при металлическом КЗ и холостом ходе в доаварийном режиме. Ни одно из этих условий обычно не выполняется

* угол α меняется в широких пределах (порядка ±90°);
* есть «мертвая зона» при близких КЗ (*U*2 →0);
* нет «мертвой зоны» при удаленных КЗ (*U*2 → *U*ном).

Отметим, что наиболее неприятный недостаток — это мертвая зона при близких КЗ, вариация угла *α* не так страшна из-за относительно широкого допуска.

**Оптимальный ОНМ.**

Очевидно, что следует, что лучше всего эти подходы сочетать:

* по возможности пользоваться чисто аварийным ОНМ по углу *β*;
* при удаленных КЗ, когда точность определения угла *β* падает ниже допустимой пользоваться послеаварийным ОНМ по углу *α*.

Это сочетание было реализовано еще в электромеханических устройствах РЗА.

Однако отметим, что такие устройства всегда старались упростить, в результате чего вместо логичного с точки зрения электротехники и математики варианта использовать комбинацию органов направления мощности (рис. 4) сделали гибридную характеристику ДЗ в форме окружности, которая сжимается/расширяется в зависимости от направления КЗ (рис. 4*б*).

Это вынужденное решение из электромеханики было вслепую скопировано современными производителями микропроцессорных релейных защит, несмотря на то, что прямой необходимости в этом не было.

Далее в широкий обиход вошли ДЗ с многоугольной характеристикой, для которых зачем-то сохранили электромеханический принцип, придумав сложный алгоритм смещения характеристики направленности (рис. 4*в*).

При этом в терминалах также есть отдельные «классические» органы направления мощности для ТЗНП, ТЗОП, МТЗ, т.е. техническая возможность сделать все как надо была, но ее не реализовали.

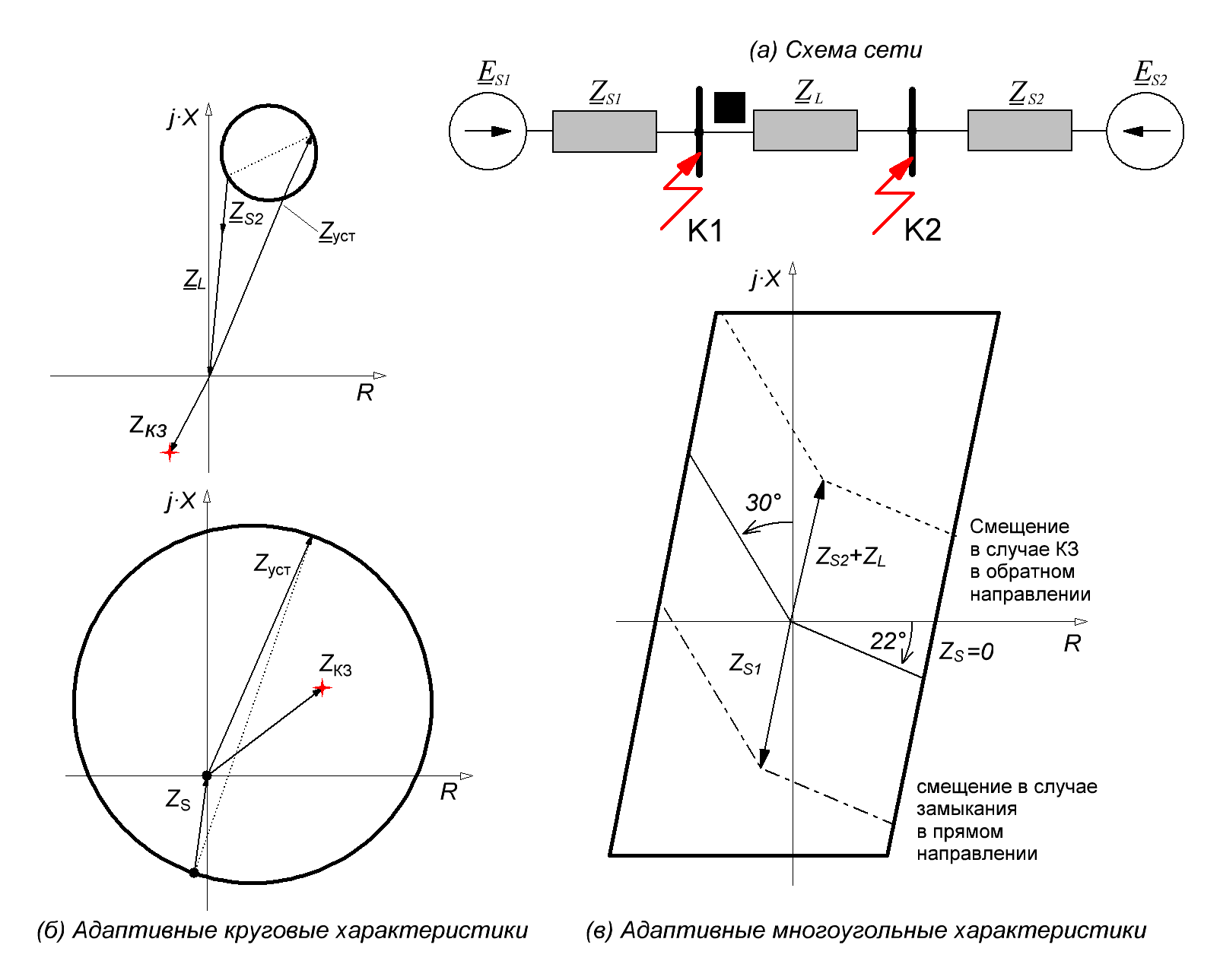


Рис.4 — Адаптивные характеристики ДЗ

Наиболее правильным видится отказ от классических характеристик направленности дистанционной защиты. Вместо этого следует использовать комбинацию органов направления мощности прямой, обратной и нулевой последовательности.

Отметим:

* для определения направления при несимметричных КЗ следует использовать ОНМ обратной *М*2 и нулевой *М*0 последовательности. Это позволит не привязываться к доаварийным напряжениям и токам в принципе, алгоритм всегда будет работать с виртуальной чисто аварийной схемой
* для определения направления при трехфазных симметричных КЗ следует, при возможности, использовать орган направления мощности прямой последовательности *М*1ав, включенный на чисто аварийные ток и напряжение
* при трехфазных КЗ с отсутствием памяти напряжения следует пользоваться классическим органом направления мощности (ОНМ) ДЗ, включенным на разность фазных токов и напряжений.

На рис. 5 показана работа органа направления мощности *M*1ав при чистом трехфазном КЗ в обратном направлении при наличии насыщения трансформаторов тока.

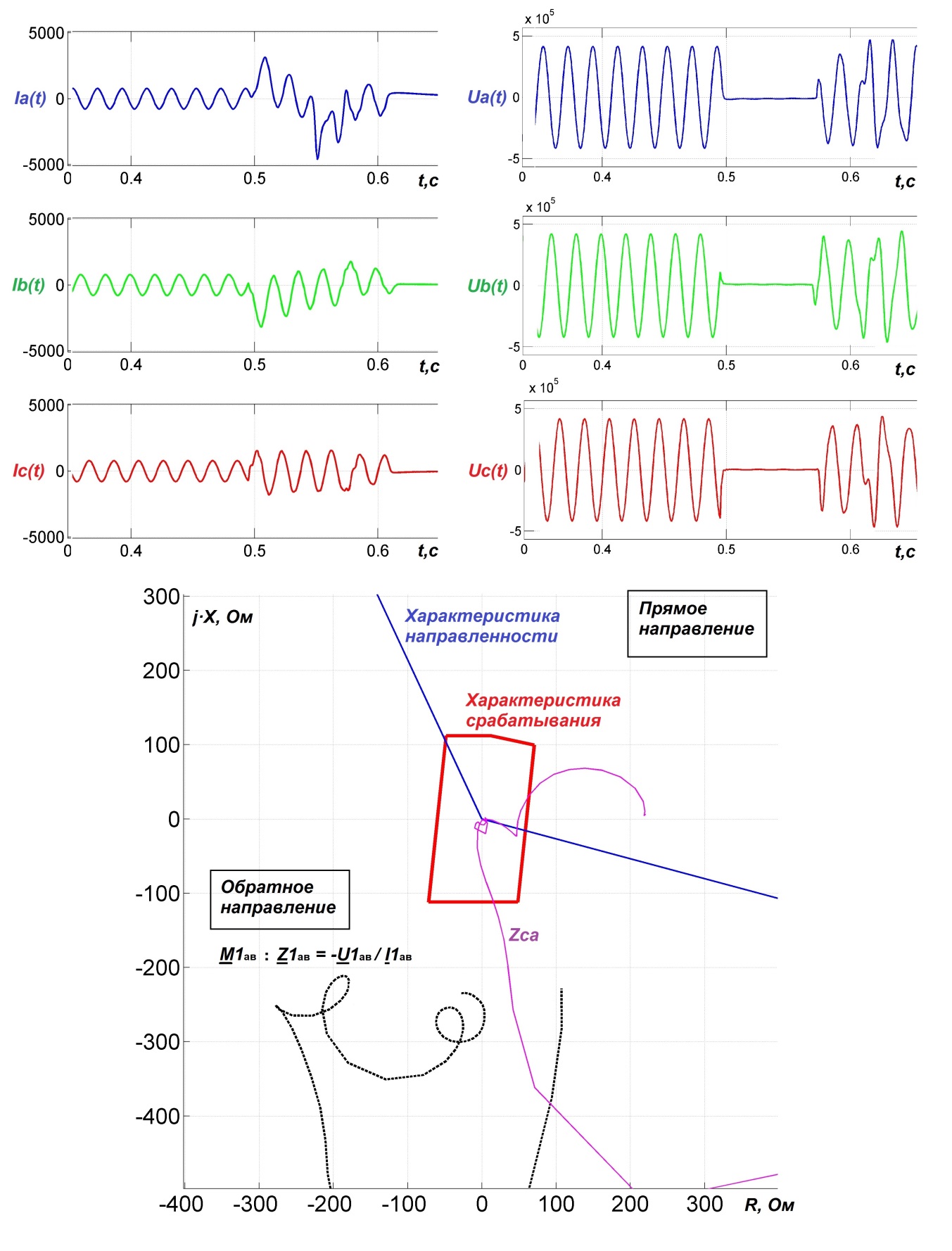


Рис. 5 — Работа ОНМ *M*1ав при близком трехфазном КЗ в обратном направлении, сопровождающимся насыщением ТТ