

Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С.

Автоматика ликвидации асинхронного режима

В книге принят следующий порядок изложения материала: анализ закономерностей изменения режимных параметров при АР в энергосистеме; их особенности, позволяющие отличить асинхронный режим от синхронных качаний; описание принципов построения и работы конкретных устройств АЛАР, что облегчает с точки зрения методологии освоение материала.

В книге использованы работы института «Энергосетьпроект» по типовым панелям АЛАР, выполненные Тоником Я. Е., Иофьевым Б. И., Медведевой Л. Н. и Царицыной Г. П. под руководством Иофьева Б. И., учтены замечания проектных и эксплуатирующих организаций по работам института, а также использованы материалы ОДУ Северо-Запада по устройству селективной автоматики прекращения асинхронного хода (САПАХ).

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензенту книги канд. техн. наук Я. Н. Лугинскому, редактору В. В. Овчинникову, а также канд. техн. наук К. А. Бринкису за ценные замечания и помощь при подготовке рукописи.

Все замечания и пожелания по данной книге просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

1. АСИНХРОННЫЙ РЕЖИМ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Основные понятия *К* Автоматика ликвидации асинхронного режима — АЛАР (старое название — автоматика прекращения асинхронного хода — АПАХ) является частью противоаварийной автоматики энергосистем и предназначена для устранения опасных явлений, возникающих в таких системах при нарушении устойчивости параллельной работы агрегатов электростанций, целых электростанций и частей объединенных энергосистем.

Как известно, устойчивость параллельной работы в нормальном режиме работы энергосистем, при авариях типа КЗ, сложных отключениях линий электропередачи и других отключениях поддерживается в энергосистемах за счет естественных синхронизирующих сил. Кроме того, для этой цели используются устройства противоаварийной автоматики (ПА), действующие в начальный момент аварии путем отключения части генераторов, аварийного управления мощностью паровых турбин, отключения части нагрузки и деления энергосистем на несинхронно работающие части. Эти устройства, получившие название автоматики предотвращения нарушения устойчивости, позволяют избежать многих тяжелых аварий и в то же время повысить эффективность использования электропередач за счет увеличения их загрузки в исходном (доаварийном) режиме. Однако предотвращение нарушений устойчивости с помощью устройств ПА в ряде случаев оказывается либо невозможным, либо нецелесообразным. В этих случаях применяют устройства АЛАР, действующие в конечном итоге на разрыв связей, устойчивость которых нарушена

Устройства АЛАР могут использоваться как в качестве резерва к устройствам автоматики предотвращения нарушения устойчивости, так и самостоятельно, без них. В обоих случаях — это автоматика, воздействующая на разрыв связей, потерявших устойчивость.

Основная функция этих устройств — выявление факта перехода режима в асинхронный. В ряде случаев требуется также выявление ускоряющейся и тормозящейся частей энергосистемы, что необходимо для восстановления синхронизма (ресинхронизации) или выбора точек деления с учетом расположения узлов нагрузки. Последнее особенно важно для тех «слабых» связей, которые служат не столько для обмена мощностями между энергосистемами, сколько для обеспечения электроснабжения потребителей, подключенных к промежуточным подстанциям. При этом деление целесообразно производить селективно, т. е. в таких точках энергосистемы, чтобы нагрузка промежуточных подстанций осталась подключенной к части энергосистемы, имеющей избыток мощности.

Условная линия, делящая энергосистему на две группы станций (генераторов), между которыми возможно нарушение параллельной синхронной работы, называется сечением асинхронного хода.

Все параметры режима энергосистемы тесно связаны между собой, и для выявления асинхронного режима (АР) используются различные параметры или их сочетания, которые и будут исследоваться далее с точки зрения возможности отстройки рассматриваемых устройств от синхронных качаний. Однако прежде, чем приступить к такому исследованию, целесообразно рассмотреть основные свойства АР и ввести соответствующие понятия и определения.

Для анализа АР обычно пользуются [1] моделью простейшей одно- и двухмашинной схемы энергосистемы, построенной в предположении постоянства ЭДС E_1 и E_2 в определенных точках по концам электропередачи. Это предположение, справедливое в силу действия ряда факторов (электромагнитных процессов в контурах ротора, работы регуляторов возбуждения сильного действия), будет использоваться и дальше в этой книге.

Параметры модели (четыреполюсника) будем описывать в терминах, характерных для работ по теории устойчивости параллельной работы энергосистем [2] и основывающихся на значениях собственного Z_{11} и взаимного Z_{12} сопротивлений электропередачи между точками постоянства ЭДС E_1 и E_2 . Эти сопротивления удобно представить с помощью их реактивных составляющих X_n , X_{12} и углов α_{11} , α_{12} , равных соответственно $90^\circ - \varphi_{11}$ и $90^\circ - \varphi_{12}$ (где φ — аргумент сопротивления Z). При этом мощность (электромагнитный момент) эквивалентного генератора $P_{эк}$ в простейшей одномашинной схеме энергосистемы может быть представлена, как известно, в виде собственной P_n и взаимной P_{i2} составляющих в соответствии с выражениями

$$P_{11} = \frac{E_1^2}{X_{11}} \sin \alpha_{11} \text{ и } P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} (\sin \delta - \alpha_{12}),$$

где δ — угол выбега ротора эквивалентного генератора, рассматриваемый в данном случае как угол между векторами E_1 и E_2 .

Для упрощения дальнейших выкладок P_{11} объединяют обычно с механическим моментом (мощностью) на валу агрегата P_m , образуя эквивалентный момент (мощность) $P_T = P_m - P_{11}$, который определяется с учетом изменений всех составляющих P_T под действием автоматики отключения части генераторов электростанций, специальной автоматики отключения части нагрузки, аварийного управления паровыми турбинами и регуляторов частоты вращения агрегатов согласно их коэффициенту статизма σ . При исчерпании регулировочного диапазона турбин (например, после достижения максимальной мощности агрегатов) учитывается изменение местной нагрузки при изменении частоты на основании частотной характеристики энергосистемы либо приближенно из расчета 2 % изменения нагрузки на 1 % отклонения частоты.

Заменив $E_1 E_2 / X_{12}$ на P_{12max} и положив что $\alpha_{12} = 0$, соответствует пренебрежению потерями в электропередаче и случаю отсутствия промежуточных отборов мощности на ней, получим известное уравнение движения ротора эквивалентного генератора (вектора E_1) относительно вектора E_2 :

$$\frac{T_J}{\omega_c} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + P_{12max} \sin \delta = P_u, \quad (1)$$

где ω_c — синхронная частота вращения (314 рад/с, или 18 000 град/с, или 50 Гц); T_J — постоянная инерции, с.

Величина ω_c должна измеряться в тех же единицах, что и δ , а T_J отнесена к той же базисной мощности P_δ , что и P_m и P_{12max} .

Поэтому при задании T_J , отнесенной к номинальной активной мощности эквивалентного агрегата $P_{ном}$ ($T_J = T_{Jном}$), последняя должна быть пересчитана согласно соотношению $T_{J\delta} = T_{Jном} P_{ном} / P_\delta$.

Уравнение (1) не интегрируется в квадратурах, поэтому для его исследования прибегают к изображению описываемого им движения на так называемой «фазовой» плоскости в координатах $(\delta, d\delta/dt)$. Для этого введем понятие мгновенного скольжения $s = d\delta/dt$ и подстановкой $dt = d\delta/s$ исключим из (1) координату времени, превратив его в уравнение с разделяющимися переменными. Указанное уравнение легко проинтегрировать при заданных начальных условиях δ_0 и s_0 .

Наибольший интерес здесь представляет случай $\delta_0 = \delta_{кр} = 180^\circ - \arcsin(P_m / P_{12max})$ и $s_0 = 0$, где $\delta_{кр}$ — критическое значение угла

передачи. При этом угле система в относительном движении будет иметь минимальную (нулевую) кинетическую энергию и максимальную потенциальную энергию, обеспечивающую возможность движения в сторону уменьшения δ . Введя параметр $\rho = P_{\text{ном}}/P_{12\text{max}}$, получим для этого случая

$$s = \pm \sqrt{2 \frac{P_{12\text{max}} \omega_c}{T_J} [\rho (\delta_{\text{кр}} - \delta) - \cos \delta_{\text{кр}} + \cos \delta]}. \quad (2)$$

Это выражение для получения семейства так называемых граничных фазовых траекторий, показанных в зависимости от параметра ρ на рис. 1 и обладающих определенными свойствами в отношении различных явлений в энергосистемах. В частности, они применимы и к явлениям, часто называемым динамическими переходами и включающими в себя КЗ, ложные отключения: нагруженных элементов системы и несинхронные включения (в том

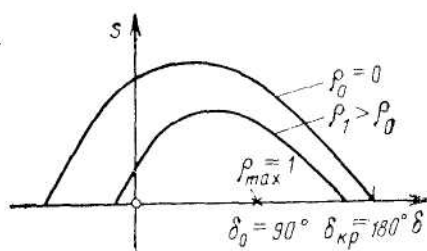


Рис. 1. Граничные фазовые траектории модели энергосистемы по уравнению (1)

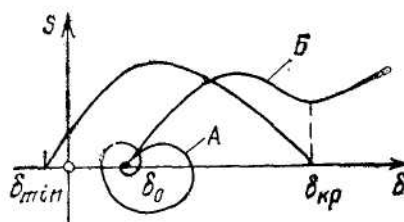


Рис. 2. Изображение движения системы при динамических переходах на фазовой плоскости:

A — устойчивый переход (построено с учетом демпфирующих свойств энергосистемы); B — неустойчивый переход

числе и автоматические), что может привести к асинхронному режиму.

Изменения s и δ системы в процессе динамического перехода могут быть легко отображены на фазовой плоскости в виде траектории движения изображающей ее точки, с соответствующими координатами в те или иные моменты времени. Примеры таких траекторий приведены на рис. 2.

Считается, что динамический переход происходит в момент, когда система находилась в установившемся режиме. Поэтому траектории изображающей точки, показанные на рис. 2 (кривые A , B) исходят из $s=0$ и $\delta = \arcsin \varphi = \delta_0$. При движении системы по траектории, соответствующей тому или иному динамическому переходу, параметр ρ может остаться неизменным, измениться скачком или плавно. Соответственно изменится и положение граничной фазовой траектории. При этом могут возникнуть два случая, изображенных на рис. 2 траекториями A и B .

Для траектории А изображающая точка все время остается внутри граничной фазовой траектории и пересекает ось абсцисс при $\delta < \delta_{кр}$. В этом случае, который может иметь место только тогда, когда площадка возможного торможения больше площадки ускорения, динамический переход будет устойчив и синхронизм после нескольких колебаний угла и скольжения восстановится.

Траектория Б, возникающая, когда площадка ускорения больше площадки возможного торможения, характеризуется тем, что изображающая точка в своем движении не пересекает ось абсцисс, а выходит за пределы граничной фазовой траектории и динамический переход является неустойчивым, так как угол δ даже при колебаниях s непрерывно возрастает.

Если предположить, что в описанном процессе производятся специальные мероприятия по уменьшению p и расширению области, охваченной граничной фазовой траекторией, то из уравнения (1) и кривых рис. 1 следует, что эти мероприятия наиболее эффективны при $p=0$, когда $\delta_{кр}=180^\circ$. После прохождения изображающей точкой этого положения вернуть систему в синхронизм в некоторых случаях (при $P_{11}>0$) теоретически возможно, но практически весьма сложно. Поэтому переход

системы за зону углов $\delta_{кр}$ считают моментом *начала асинхронного режима*.

Дальнейший рост угла и подход его в зону $\delta \approx 360^\circ$ называют первым асинхронным проворотом или первым *циклом асинхронного хода*. За ним могут последовать второй, третий циклы асинхронного хода и т. д. На рис. 3,а показано изменение угла δ в установившемся АР; при этом угол показан изменяющимся в диапазоне $— 180^\circ \div +180^\circ$ (периодизация угла).

На рис. 3,в и г показаны также изменения тока по передаче и напряжения в одной из ее точек при установившемся АР. Это — сигналы промышленной частоты при отсутствии отбора на передаче, модулированные синусоидой от угла $\delta/2$. Напряжение в одной из точек передачи, называемой *электрическим центром качаний* (ЭЦК), падает до нуля (на рис. 3,г не показано). Однако, несмотря на присутствие здесь термина «качание», следует различать АР от близкого ему режима синхронных качаний.

Особенностью режима синхронных качаний по сравнению с АР является отсутствие выхода изображающей точки за пределы граничной фазовой траектории, соответствующей данному конкретному режиму. Отсюда диапазон колебаний угла при синхронных качаниях лежит в пределах $\delta_{тил} - \delta_{кр}$. Им соответствуют колебания мощности, а предельная скорость изменения угла и

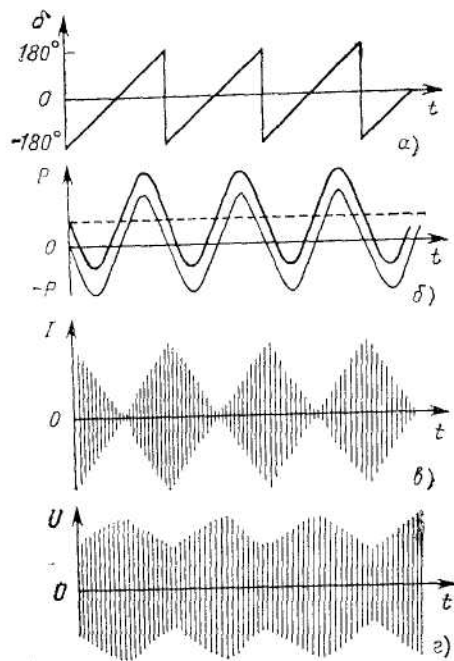


Рис. 3. Изменение режимных параметров при установившемся АР

9

мощности определяется величиной $s(\delta_0)$ на граничной траектории.

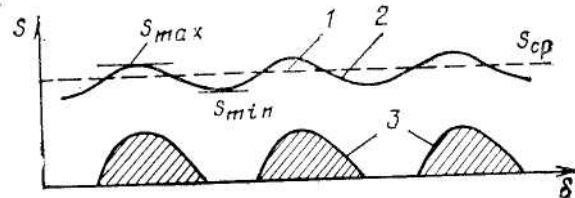
Изменения режимных параметров в АР показаны для случая *полнофазного симметричного режима* работы электропередачи (неполнофазный режим анализируется обычным методом симметричных составляющих). При АР с достаточно большим скольжением в электромагнитной мощности генератора P_z могут быть выделены две составляющие. Одна из них, показанная на рис. 3,б тонкой линией, пропорциональна $P_{12\max} \sin \delta$ и при непрерывном изменении угла меняется периодически со средним значением, равным нулю. Очевидно, что она практически не дает энергии потребителю и не создает момента сопротивления на валу агрегата. Вторая составляющая — прямая линия, показанная пунктиром — это *средний асинхронный момент*, возникающий в генераторе так же, как в двигателе, но с противоположным знаком и связанный сложной зависимостью со скольжением [2]. Значение среднего асинхронного момента обычно невелико, поэтому при переходе в АР генераторы передающей части системы ускоряются, что вызывает действие их регуляторов частоты вращения с соответствующим уменьшением P_m и, следовательно, p . Результирующий момент при АР изображен на рис. 3,б жирной линией. В тот или иной момент времени изображающая точка может войти внутрь зоны, определяемой граничной фазовой траекторией. Такое явление называется *самопроизвольной ресинхронизацией* и может быть допущено при соблюдении определенных условий, подробно описанных в [1] и сводящихся к ограничениям тока. Кроме того,

считается, что АР по условиям работы всех потребителей допустим, если напряжение в узловых точках сети снижается не более чем на 20 % номинального (рис. 3, г).

Если условия работы электропередачи таковы, что самопроизвольной ресинхронизации не происходит, то под действием регуляторов частоты вращения и ряда других факторов возникает баланс между P_s и средним асинхронным моментом при неравенстве частот E_1 и E_2 ($\Delta f = f_1 - f_2 \neq 0$), т. е. имеет место так называемый установившийся асинхронный режим, изображение которого на фазовой плоскости приведено на рис. 4 (кривые 1 и 2, заштрихованы зоны допустимых скольжений под граничными фазовыми траекториями — кривая 3).

Установившийся АР характеризуется условным понятием среднего скольжения, Гц: $s_{cp} = (s_{max} + s_{min})/2$. Эта величина показана на рис. 4 пунктиром. В отличие от мгновенного значения скольжения среднее скольжение при установившемся АР показано на рис. 4 как величина постоянная, хотя при медленном изменении режима (например, при воздействии на механизмы управления турбинами) s_{cp} в действительности медленно меняется. Экспериментально s_{cp} может быть определено по периоду колебаний мощности в цикле асинхронного хода $T_{a,x}$, как показано на рис. 3. Согласно определению среднее скольжение равно Гц, или $2/T_{a,x}$, %, где $T_{a,x}$ — в секундах.

Рис. 4. Изображение установившегося АР на фазовой плоскости



Поскольку действие факторов, влияющих на работу энергосистемы при установившемся АР, проявляется через величину s_{cp} то возникает вопрос о наибольшем значении этого параметра, при котором система обязательно втянется в синхронизм. В литературе это называется допустимым по условию ресинхронизации скольжением $s_{cp, доп}$. Очевидно, что здесь следует исходить из наиболее широкой области под граничной фазовой траекторией, что имеет место при разгрузке передачи, когда воздействием на число генераторов, их мощность и местную нагрузку приводят режим системы к $\delta_{кр} = 180^\circ$ ($\rho = 0$). Тогда выражение (2) преобразуется в

$$s = \pm \sqrt{2P_{1max}\omega_c(1 + \cos\delta)/T_J},$$

и поскольку рассматривается случай установившегося АР, то зависимость $s_{cp}(t)$ имеет форму периодически

колебаний $(d\delta/dt=\text{const})$ сложной формы (см. рис. 4, кривая 3), ограниченных величинами $2\sqrt{P_{12\max}\omega_c/T_J}$ и 0. Существуют два способа усреднения этих колебаний: первый [1] — делением пополам, что дает рабочую формулу, %:

$$s_{\text{ср max}} = 5,65 \sqrt{\frac{P_{12\max}}{T_J P_\delta}}, \quad (3)$$

(здесь T_J — в секундах и приведено к P_δ ; $P_{12\max}$ и P_δ — в мегаваттах); второй [3] — введением усредняющего коэффициента, определенного экспериментально в процессе математического моделирования. В проектной практике используется первый из них.

Полученная величина определяет среднее скольжение, при котором обязательно наступит ресинхронизация, и ее часто называют критическим скольжением, однако здесь следует иметь в виду, что это же название присвоено максимуму асинхронной характеристики генератора и двигателя.

Отметим, что на практике существует некоторая вероятность восстановления синхронизма при скольжении больше указанной величины, однако при расчетах автоматики ликвидации АР исходят именно из среднего (критического) скольжения.

При анализе асинхронного режима рассматривается только так называемое относительное движение в энергосистеме — вращение вектора E_1 относительно E_2 . В одномашинной модели энергосистемы это происходит автоматически, так как частота в ее приемной части $f_2 = f_{\text{ном}} = \text{const}$. Однако приведенный выше анализ АР может быть распространен и на случай относительного движения двухмашинной энергосистемы с постоянной инерции генераторов по концам передачи T_{J1} и T_{J2} и составляющими мощности соответственно P_{M1} и P_{M2} . Это может быть сделано путем замены двухмашинной энергосистемы эквивалентной одномашинной с постоянной инерции $T_{J\text{эк}} = T_{J1}T_{J2}/(T_{J1} + T_{J2})$, составляющие которой приведены к P_δ .

Известно, что при возникновении АР в энергосистеме существует опасность протекания сверхтоков, максимальных при $\delta \approx 180^\circ$ и повреждения валов агрегатов в результате торсионных (механических) колебаний. В этом режиме существует еще одна опасность, связанная с понижением напряжения в промежуточных узлах магистральных электропередач, что приводит к нарушению работы подключенных к ним потребителей. Кроме того, глубокие периодические колебания напряжения при АР чрезвычайно опасны для сложных (многомашинных) энергосистем возможностью возникновения низкочастотного электромеханического резонанса на соседних электропередачах, из-за чего двухчастотный АР может превратиться в многочастотный, ликвидируемый только делением.

С другой стороны, деление энергосистем разрывом электропередач по сечениям асинхронного хода лишает возможности передать в

соответствующие части системы некоторую мощность, возникающую благодаря асинхронному моменту генераторов (асинхронной составляющей мощности). В связи с этим в решении проблемы ликвидации АР в СССР могут быть выделены два этапа.

В период 50—60-х годов, когда схемы отечественных энергосистем не отличались большой сложностью, а их деление при АР могло привести к нежелательному развитию аварии, стремились оставить в работе потерявшие устойчивость передачи, для которых это допустимо, в расчете на самопроизвольную ресинхронизацию, т. е. обеспечить так называемую результирующую устойчивость. В этом случае автоматика ликвидации АР должна была строиться таким образом, чтобы не осуществлять разрыв связей, пока существует вероятность достаточно быстрого восстановления синхронизма, и способствовать ему проведением различных мероприятий (например, уменьшением небаланса мощности, возникшего при АР, см. § 2). Такие условия существуют кое-где и сейчас, и они наложили свой отпечаток на схемы ряда устройств АЛАР. Однако в последующий период схемы отечественных энергосистем существенно усложнились. Большая часть этих систем вошла в ЕЭС СССР, для которой опасность электромеханического резонанса при АР на магистральных связях чрезвычайно возросла, а многочастотный АР недопустим. Кроме того, увеличилось количество электропередач со значительным промежуточным отбором мощности. Поэтому сейчас преобладаем другой подход к проблеме ликвидации АР, согласно которому этот режим должен прекращаться в основном в первом его полупериоде путем разрыва электропередачи с выбором оптимальных точек деления. Устройства, описанные в настоящей книге, позволяют реализовать оба этих подхода и их комбинацию.

Основными требованиями к этим устройствам являются селективность, необходимость их блокирования в режиме КЗ (в некоторых случаях это требование относят только к несимметричным КЗ), а также блокирование при обрывах в цепях напряжения и исчезновении тока.

В соответствии с результатами исследований, изложенными в [5], устройства, предназначенные для работы в условиях установившегося АР и близких к нему, могут выполняться и настраиваться в предположении постоянства модуля и аргумента сопротивления, замещающего промежуточный отбор мощности. Устройства, предназначенные для работы в первом цикле асинхронного хода, должны обладать необходимым быстродействием. Кроме того, устройства должны отвечать обычным требованиям, предъявляемым к устройствам релейной защиты и автоматики в части надежности, помехозащищенности, влияния температуры окружающей среды и т. д.

Способы ликвидации АР в энергосистеме. Возникновение асинхронного режима возможно между любыми группами генераторов, и поэтому его

рассматривают в каком-либо сечении или вне его. В первом случае говорят о двухчастотном АР по контролируемому сечению (асинхронный ход по сечению), по сторонам от которого каждая группа генераторов работает со своей частотой и синхронно внутри группы, а во втором случае — о двухчастотном АР по сечению, не совпадающему с контролируемым (внешний асинхронный ход). Автоматическая ликвидация АР в электроэнергетической системе (ЭЭС) может быть осуществлена:

- путем ресинхронизации, т. е. восстановления синхронной работы частей ЭЭС по сечению асинхронного хода;
- разрывом связей по сечению асинхронного хода, т. е. делением ЭЭС на несинхронно работающие части;
- разрывом части связей по сечению асинхронного хода и ресинхронизацией оставшихся несинхронно идущих генераторов, т. е. комбинированным способом.

Способ ликвидации АР определяется прежде всего допустимой длительностью существования этого режима. В общем случае длительность АР (при его выявлении с помощью автоматики) рекомендуется ограничивать временем обычно не более 30 с; при этом длительность АР может быть оценена в соответствии с рекомендациями [1].

Общий подход к ликвидации АР может быть описан следующим алгоритмом (рис. 5):

- при возможности осуществления достаточно эффективной ресинхронизации в первую очередь необходимо способствовать выполнению мероприятий, направленных на облегчение условий ресинхронизации; если ресинхронизация не произойдет через заданное время Δt_{AP} или заданное количество циклов n_{AP} , то выполняется деление по сечению асинхронного хода;
- при недопустимости АР или малой эффективности ресинхронизации необходимо быстро выполнить деление энергосистемы, причем правильное всего — по сечению асинхронного хода, поскольку такое деление немедленно прекращает двухчастотный АР, не требуя дальнейшей ресинхронизации в разделившихся частях ЭЭС; деление может сопровождаться коррекцией баланса мощностей в разделившихся частях;
- если ресинхронизация эффективна в части энергосистемы, то следует рассмотреть возможность деления по соответствующему соседнему сечению с выполнением мероприятий по ресинхронизации выделенных генераторов, т. е. применить комбинированный способ, обуславливающий снижение небаланса мощности и улучшение условий ресинхронизации.

Выявление многочастотного АР мы не будем рассматривать из-за отсутствия практических технических решений по его селективному выявлению.

Однако при выборе способа ликвидации АР он должен учитываться, для чего должна быть проанализирована возможность его возникновения и определены его возможные сечения. Вероятность возникновения многочастотного АР или перехода к нему от двухчастотного тем больше, чем больше разница в параметрах агрегатов, влияющих на электромеханический процесс. В частности, перерастание

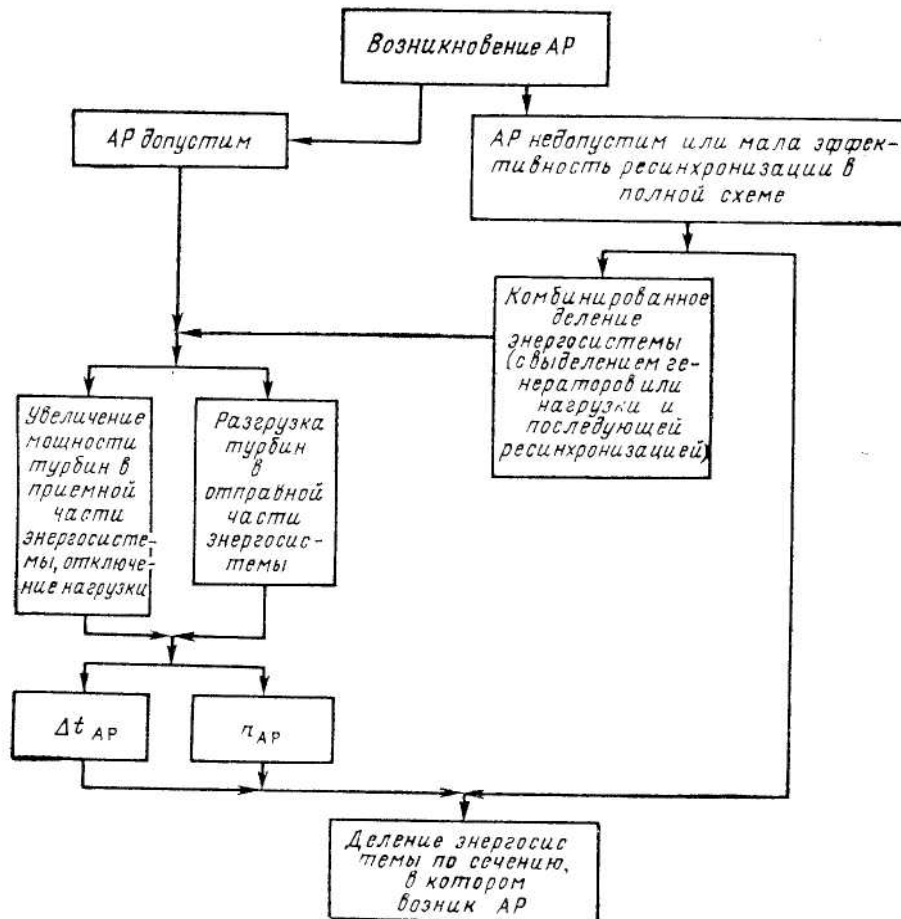


Рис. 5. Алгоритм ликвидации АР

двухчастотного АР в многочастотный можно ожидать, если при расчетном двухчастотном асинхронном режиме ЭЦК окажется расположенным одновременно на двух и более генерирующих ветвях. Такая ситуация свидетельствует о том, что асинхронно будут идти между собой и генераторы, расположенные по одну сторону от сечения асинхронного хода, поскольку при периодических снижениях напряжения на генераторных ветвях (вплоть до нуля) и некоторой неидентичности условий работы указанных генераторов сохранение их параллельной работы практически невозможно.

Многочастотный АР особенно опасен по своим последствиям, ресинхронизация при нем маловероятна, а известные устройства АЛАР могут отказаться. Поэтому необходимо всемерно предотвращать многочастотный АР как средствами автоматического управления

мощностью с целью сохранения устойчивости, так и АЛАР. Если двухчастотный АР развивается в многочастотный быстрее, чем действуют устройства АЛАР, или сразу возникает многочастотный АР, то последний можно предотвратить предупредительным делением ЭЭС. Это можно выполнить до возникновения АР с помощью устройств противоаварийной автоматики предотвращения нарушения устойчивости [6].

Если предупредить многочастотный АР селективно настраиваемыми устройствами невозможно или если меры предупреждения могут оказаться неэффективными, целесообразно выполнять специальное неселективное устройство, которое при АР должно делить ЭЭС на приблизительно сбалансированные части, в каждой из которых возможен двухчастотный и маловероятен многочастотный АР. Ликвидация двухчастотного АР в разделившихся частях должна уже возлагаться на известные устройства АЛАР. Устройство, на которое возлагается неселективное деление ЭЭС, должно быть предельно простым, чтобы исключить его отказ в многочастотном АР. В частности, устройство может быть выполнено без выдержки времени и счета циклов при глубоком понижении напряжения и большом токе во всех трех фазах узловой точки сети (примеры схем такого рода делительных устройств приведены в [7, 8]).

2. РЕЖИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА И СПОСОБЫ ЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ

Основные принципы выявления асинхронного режима. Для выполнения мероприятий по ликвидации АР в случае его возникновения должны применяться устройства АЛАР, реализующие определенные способы выявления АР. Сами способы должны соответствовать техническим требованиям, предъявляемым в ЭЭС к устройствам АЛАР. Эти требования различаются в частности для устройств, предназначенных выявлять АР до достижения критического угла (на первом цикле), и устройств, выявляющих АР через заданное количество циклов асинхронного хода или заданное время.

В качестве основных технических требований, являющихся общими для обеих групп устройств, могут быть названы.

- а) селективность выявления АР (отличие его от синхронных качаний, отличие асинхронного хода в контролируемом сечении от внешнего асинхронного хода, определение знака скольжения);
- б) чувствительность к АР (характеризуется отношением значения контролируемого параметра к его же значению, соответствующему моменту наступления АР, или способностью устройства фиксировать изменение какого-либо признака, которое характеризует момент наступления АР);

- в) быстрота действия (время выявления АР);
- г) простота выполнения и надежность функционирования;
- д) степень универсальности применения устройств (в сетях сложной конфигурации).

Принципы выполнения устройств АЛАР должны, очевидно, определяться способами выявления АР, которые, в свою очередь, основываются на отличительных признаках самого процесса АР или изменениях каких-либо режимных параметров. Эти способы можно разбить на две группы.

Для первой из них, позволяющих отличить АР от динамически устойчивого режима, ведущего к синхронным качаниям, возможно использование следующих признаков АР' суммарная интенсивность возникшего возмущения, превышающая граничную по условиям сохранения устойчивости [6], и выход послеаварийного режима за пределы соответствующей ему граничной фазовой траектории [1]. Однако, поскольку оба способа обычно применяются в устройствах ПА, обеспечивающих устойчивость параллельной работы ЭЭС, использовать их в устройствах АЛАР нецелесообразно, это привело бы к принципиальному и аппаратному совмещению устройств АЛАР с устройствами ПА и, как следствие, к потере полноценного резервирования последних. Эти методы используются иногда для предупредительного деления ЭЭС, чтобы следующее за возмущением возникновение АР в одной части ЭЭС не привело к АР в другой его части [6, 8].

Ко второй группе способов выявления АР следует отнести способы, использующие особенности изменения некоторых режимных параметров при асинхронном режиме в ЭЭС. Наиболее простой из них — способ непосредственного контроля взаимного угла между заданными векторами эквивалентных ЭДС, т. е. контроля параметра, входящего в определение термина «асинхронный режим». Однако этот способ встречает трудности методического плана, в особенности применительно к ЭЭС с несколькими источниками генерации, хотя аппаратно, в принципе, и может быть реализован [9].

Используемые на сегодняшний день в практике проектирования и эксплуатации устройства АЛАР построены на принципах, использующих особенности изменения режимных параметров при асинхронном режиме в ЭЭС [10], к рассмотрению которых мы и перейдем.

Рассмотрим используемые в применяемых устройствах АЛАР закономерности изменения в условиях АР некоторых режимных параметров. К таким параметрам могут быть отнесены: U_n — напряжение в контролируемой точке n электропередачи; I_n — ток электропередачи, измеренный в точке n ; Z_{pn} — сопротивление на зажимах реле сопротивления, установленного в точке n ; φ_{pn} — угол между

напряжением и током в точке n (равен аргументу вектора— $\underline{Z}_{pn}$); P_n, Q_n

соответственно активная и реактивная мощности, измеренные в точке n ; $\angle \varphi_{n1n2}$ —скольжение вектора напряжения в точке n_1 относительно вектора напряжения в точке n_2 .

Закономерности изменения указанных параметров рассмотрим на примере электропередачи с промежуточным отбором мощности (рис. 6), включающим в себя ее емкостную проводимость, так как, очень часто именно к такому виду может быть, приведена реальная электропередача. Рассматриваемый подход позволяет наиболее просто оценить возможности выявления АР в двухмашинной схеме замещения ЭЭС. Примем следующие допущения и условия (рис. 6):

а) АР рассматривается в схеме сети с двумя эквивалентными генераторами с ЭДС E_1 и E_2 , значения которых с учетом действия регуляторов напряжения, а также явнотолерности части генераторов изменяются в диапазоне 0,9—1,1 номинальной величины;

б) электропередача включает в себя сопротивления элементов, примыкающих к ЭЭС, и принимается однородной по всей длине, с эквивалентным комплексным сопротивлением $\underline{Z}_{эк}$ его аргументом $\varphi_{эк}$;

в) в диапазоне реальных изменений частоты, происходящих а АР, сопротивление $\underline{Z}_{эк}$ принято постоянным;

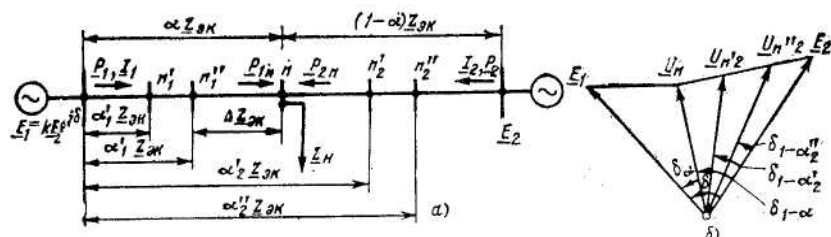


Рис. 6. Расчетная схема и векторная диаграмма двухмашинной схемы замещения с отбором мощности

2—6383

17

г) мощность отбора характеризуется комплексным сопротивлением $\underline{Z}_n$ (аргумент φ_n), зависящим в общем случае от напряжения и, следовательно, от угла между эквивалентными ЭДС; для некоторого упрощения трактовки выражений, характеризующих зависимости режимных параметров при АР, и выделения основных закономерностей сопротивление $\underline{Z}_n$ принимается неизменным при установившемся АР [4]; это допущение не влияет на полученные в общем виде формулы;

д) сопротивления участков линии между ЭДС E_1, E_2 и точкой отбора (точка n на рис. 6,а) составляют $\alpha \underline{Z}_{эк}$ и $(1-\alpha) \underline{Z}_{эк}$, где α — относительная удаленность точки отбора от ЭДС E_1 (сопротивление $\underline{Z}_{эк}$ принято за единицу);

е) ток емкостной проводимости мал и может не приниматься в расчет (частично может быть учтен увеличением модуля ЭДС);

ж) в качестве критического угла $\delta_{кр}$, если это специально не оговорено, принимается угол $\delta=180^\circ$;

з) все расчеты и анализ проводим для действующих значений токов и напряжений в полнофазном режиме;

и) обозначения и положительные направления векторов, а также направления отсчета углов приведены на рис. 6,б, при этом вектор E_2 принят совпадающим с положительным направлением вещественной оси.

Изменение тока. Используя метод наложения, в соответствии с принятыми положительными направлениями (см. рис. 6), выражение для определения тока I_1 можем записать как

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_{11}} - \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_{12}} = \frac{\underline{F}_2}{\underline{Z}_{3K}} \frac{k(1+M)e^{j\delta} - 1}{1 + \alpha M}, \quad (4)$$

где $\underline{Z}_{11} = \alpha \underline{Z}_{3K} + (1 - \alpha) \underline{Z}_{3K} \underline{Z}_{11} / [\underline{Z}_{11} + (1 - \alpha) \underline{Z}_{3K}]$ — собственное сопротивление; $\underline{Z}_{12} = \alpha \underline{Z}_{3K} + (1 - \alpha) \underline{Z}_{3K} + \alpha \underline{Z}_{3K} (1 - \alpha) \underline{Z}_{3K} / \underline{Z}_{11}$ — взаимное сопротивление; $M = (1 - \alpha) \underline{Z}_{3K} / \underline{Z}_{11}$ — отношение сопротивления участка линии за точкой отбора к сопротивлению ветви нагрузки; $k = E_1 / E_2$. В соответствии с допущением п. «и» фаза тока от считывается от опорного вектора напряжения E_2 , относительно которого определены фазы всех векторов напряжения.

Годографом вектора тока $\underline{I}_1 = f(\delta)$ является окружность, так как зависимость (4) может быть представлена в виде

$$\underline{I}_1 = \underline{p}_{I1} + \underline{R}_{I1}, \quad (5)$$

где радиус окружности

$$\underline{R}_{I1} = \frac{k E_2}{\underline{Z}_{3K}} \frac{|1 + M|}{|1 + \alpha M|} e^{j(\delta + \varphi_{1+M} - \varphi_{3K} - \varphi_{1+\alpha M})},$$

случая отсутствия отбора мощности ($Z_H = \infty$, $M = 0$) на рис. 8 приведена зависимость

$I_1 = f(\delta)$ для $k = 1,0$ и $k = 0,9$. Характерная особенность указанной зависимости — наличие четко проявляющихся максимума и минимума. Отличие АР от синхронных качаний с точки зрения изменения тока заключается только в максимальном значении тока в цикле качаний и в длительности этих качаний. Поскольку угол δ при синхронных качаниях теоретически может достигать своего критического значения, нельзя отличить АР от синхронных качаний только по значению тока. В известной степени селективно АР можно выявить лишь по длительным колебаниям тока с амплитудой не менее заданной и периодом не более расчетного.

Поскольку в устройствах АЛАР применяются реле тока, реагирующие на колебания тока (см. § 3), для оценки их чувствительности к АР представляют практический интерес возможные экстремальные — максимальное и минимальное — значения тока в цикле АР.

Отношение экстремальных значений тока в цикле асинхронного хода в функции угла определяется из (4) и (5) как

$$\frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{|(1 + \underline{M}) k e^{j(180^\circ - \varphi_{1+M})} - 1|}{|(1 + \underline{M}) k e^{j(0^\circ - \varphi_{1+M})} - 1|} = \frac{k|1 + \underline{M}| + 1}{k|1 + \underline{M}| - 1}, \quad (7)$$

где $|1 + \underline{M}| = \sqrt{1 + 2M \cos \varphi_M + M^2}$; $\varphi_M = \arg \underline{M} = \varphi_{\Sigma K} - \varphi_H$; $M = |\underline{M}|$.

Можно показать [11], что минимальное значение отношения по (7), определяющее чувствительность реле тока в каждом заданном режиме, будет для диапазона $90^\circ < \varphi_M < 270^\circ$ при $\alpha = 1 + (Z_H/Z_{\Sigma K}) \cos \varphi_M$, а для диапазона $90^\circ > \varphi_M > 270^\circ$ — при $\alpha = 0$.

Для принятого диапазона изменения режимных параметров это отношение может колебаться от ∞ (при равенстве нулю знаменателя) $= 70^\circ$, $\varphi_H = 30^\circ$ до 2,5 (при максимальном $k = 1,25$, $\alpha = 0$, $Z_{\Sigma K}/Z_H = 1$, $\varphi_{\Sigma K} =$

При определении работоспособности реле тока в разных схемах сети в условиях АР должно быть учтено, что минимальное значение I_{max} и максимальное значение I_{min} достигаются в разных схемах сети. При этом, если в обеих выбранных расчетных схемах возможно электрическое перемещение точки отбора, должны быть дополнительно определены минимум I_{max} и максимум I_{min} в функции α .

Наличие отбора мощности снижает минимальную величину отношения токов по (7) по сравнению со случаем отсутствия и, следовательно, в принципе ухудшает условия работы реле тока в цикле асинхронного хода.

Соотношения для тока I_2 могут быть получены так же, как для I_1 . Можно показать, что

$$I_2 = \frac{\underline{E}_2}{Z_{\Sigma K}} \left(1 + \frac{\alpha M}{1 - \alpha} - k e^{j\delta} \right) / (1 + \alpha M) \quad (8)$$

м I_{2max} наступает при угле, большем 180° ,

$$\delta_{I2} = 180^\circ + \varphi_{1+\alpha M/(1-\alpha)}, \quad (9)$$

где $\varphi_{1+\alpha M/(1-\alpha)} = \arg(1 + \alpha M/(1 - \alpha))$.

Изменение напряжения и угла между двумя векторами напряжения. Вектор напряжения в точке отбора мощности может быть представлен выражением

$$\underline{U}_n = \underline{E}_1 - \underline{I}_1 \alpha Z_{\Sigma K} = \frac{\underline{E}_2}{1 + \alpha M} [\alpha + (1 - \alpha) k e^{j\delta}]. \quad (10)$$

Векторы напряжения в промежуточных точках n_1 (до точки отбора) и n_2 (за точкой отбора) по рис. 5 могут быть представлены соответственно выражениями

$$\underline{U}_{n1} = \underline{E}_1 - \alpha_1 Z_{\Sigma K} \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_2}{1 + \alpha M} \{ \alpha_1 + [(1 - \alpha) + (\alpha - \alpha_1) M] k e^{j\delta} \}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{n2} = \underline{E}_2 - (1 - \alpha_2) Z_{\Sigma K} \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{1 + \alpha M} \left\{ \alpha_2 + \frac{\alpha_2 - \alpha}{1 - \alpha} \alpha M + \right. \\ \left. + (1 - \alpha_2) k e^{j\delta} \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где α_1 и α_2 — относительная удаленность контролируемых точек соответственно n_1 и n_2 от $\underline{E}_1$. Из (10) — (12) следует, что максимум U_n наступает при $\delta = 0^\circ$, минимум — при $\delta = 180^\circ$, а в промежуточных точках электропередачи экстремальные значения напряжения наступают при углах, отличных от 0 до 180° . Например, минимум U_{n1} наступает при $\delta = 180^\circ - \arg[1 - \alpha_1 + (\alpha - \alpha_1) M]$, а максимум — при $\delta = -\arg[1 - \alpha_1 + (\alpha - \alpha_1) M]$. Наличие такой закономерности породило способ фиксации АР по периодическому снижению напряжения до некоторого значения, аналогичный способу фиксации АР по колебаниям тока.

Из (10) — (12) также видно, что годографы векторов напряжения являются окружностями относительно вектора $\underline{\dot{E}}_2$. Так, например, для U_n радиус и смещение окружности равны соответственно

$$\underline{R}_{on} = \frac{(1 - \alpha) k \underline{E}_2}{|1 + \alpha M|} e^{j(\delta - \varphi_{1+\alpha M})}; \quad \underline{p}_{on} = \frac{\alpha \underline{E}_2}{|1 + \alpha M|} e^{-j\varphi_{1+\alpha M}}. \quad (13a)$$

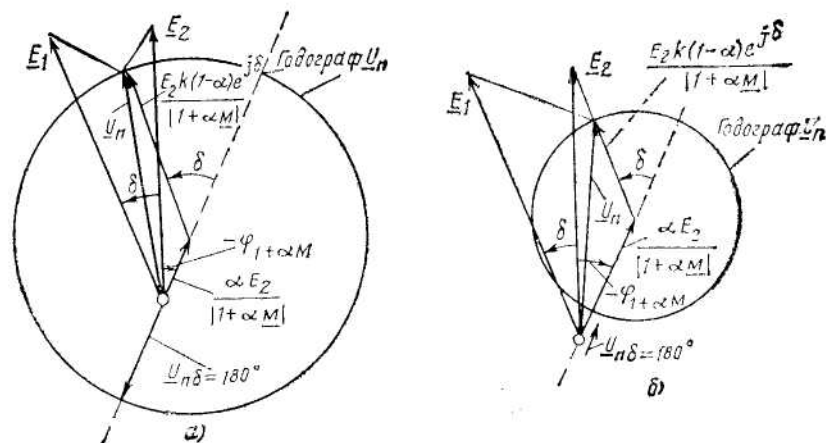


Рис. 9. Векторная диаграмма напряжения в точке отбора:

а — при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$; б — при $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$

Окружностями же являются годографы этих векторов, если их построить относительно вектора E_1 (в этом случае принимают E_1 неподвижным, а положительное направление отсчета угла δ — совпадающим с вращением E_2 по часовой стрелке); так, для вектора напряжения в точке отбора имеем

$$\underline{U}_{nE1} = \underline{U}_n e^{-j\delta} = \frac{E_2}{1 + \alpha M} [(1 - \alpha)k + \alpha e^{-j\delta}]. \quad (106)$$

При АР вектор E_1 совершает провороты относительно вектора E_2 , принятого неподвижным. При некотором значении угла δ вектор будет находиться в противофазе с вектором E_2 (рис. 9,а) или с E_1 (рис. 9,б) в зависимости от размещения точки отбора и, следовательно, в цикле асинхронного хода возможно снижение напряжения в какой-либо точке электропередачи до нуля. Этой точкой является электрический центр качаний. Для ее нахождения обозначим угол между E_1 и E_2 , при котором выполняется упомянутое условие, как δ_{U0} , ее относительную удаленность от $E_1 - \alpha_{\text{ЭЦК}}$, напряжение в этой точке — $\underline{U}_{a \text{ ЭЦК}}$, напряжение в точке отбора — $\underline{U}_{nU0}$ при $\delta = \delta_{U0}$.

Из условия нахождения в противофазе векторов E_1 и $\underline{U}_{nU0}$ угол δ_{U0} может быть определен как

$$\delta_{U0} = \arcsin \left[-\frac{(1 - \alpha)kM}{|1 + \alpha M|} \sin \varphi_M \right] - \varphi_{1 + \alpha M}, \quad (13)$$

а в случае нахождения в противофазе векторов E_2 и $\underline{U}_{nU0}$ он определяется как

$$\delta_{U0} = \arcsin \left[\frac{\alpha^2 M}{(1-\alpha)k} \sin \varphi_M \right] + \varphi_{1+\alpha M}. \quad (14)$$

С учетом (13), (14) удаленность ЭЦК от E_1 определяется соответственно

$$\alpha_{\text{ЭЦК}} = \alpha \frac{k|1+\alpha M|}{k|1+\alpha M| - \alpha \cos(\delta_{U0} + \varphi_{1+\alpha M}) - (1-\alpha)k \cos \varphi_{1+\alpha M}}; \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{ЭЦК}} = (1-\alpha) \frac{\alpha \cos \varphi_{1+\alpha M} + (1-\alpha)k \cos(\delta_{U0} - \varphi_{1+\alpha M})}{\alpha \cos \varphi_{1+\alpha M} + (1-\alpha)k \cos(\delta_{U0} - \varphi_{1+\alpha M}) - |1+\alpha M|} + \alpha. \quad (15a)$$

Для электропередачи без отбора мощности ($M = 0$)
где

$$\alpha_{\text{ЭЦК}} = \alpha'_{\text{ЭЦК}} = k/(k+1), \quad (15b)$$

$\alpha_{\text{ЭЦК}}$ относительная удаленность ЭЦК при отсутствии отбора α' мощности. Можно также показать, что при наличии отбора ЭЦК располагается между точкой отбора и точкой, характеризуемой $\alpha'_{\text{ЭЦК}}$.

Изложенное выше позволяет сделать вывод, что при АР векторы напряжения двух произвольных точек электропередачи совершают относительно друг друга полные провороты, если эти точки лежат по разные стороны от ЭЦК; если точки лежат по одну сторону от ЭЦК, происходят колебания, не превышающие по амплитуде 180° . Так, при качаниях угол $\delta_{\text{кач}}$ между вектором $\underline{U}_n$ и ЭДС в пределе может составить, очевидно (см. рис. 9, а, б),

$$90^\circ - \varphi_{1+\alpha M} \geq \delta_{\text{кач}} \geq -(\varphi_{1+\alpha M} + 90^\circ). \quad (16)$$

Если вектор E_1 опережает E_2 , то $\underline{U}_n$, расположенный между E_1 и ЭЦК, отстает от E_1 по мере возрастания угла δ , совпадает с E_1 при $\delta = \delta_{U0}$, опережает E_1 по ходу его вращения и через 180° совпадает с ним.

Ввиду использования в устройствах АЛАР схем моделирования вектора напряжения удаленной точки электропередачи представляет интерес оценка принципиальных возможностей таких схем. Так, при моделировании электропередачи, имеющей промежуточный отбор мощности (см. рис. 6, а), двухполюсником с сопротивлением $Z_{\text{дп}} = Z_{11}$ и

использовании E_1 и I_1 можно получить в соответствии с (4) вектор $\vec{K_2 E_2}$, а при $Z_{2n} = Z_{12}$ и использовании напряжения $\underline{K_1 E_1}$ и тока $\underline{I_1}$ вектор E_2 , где $K_1 = Z_{12}/Z_{11} = 1 + (1 - \alpha)M$, $K_2 = 1/K_1$.

С учетом изложенного практический интерес может представить контроль угла между векторами напряжения в точках, расположенных по одну сторону от точки отбора мощности, так как в этом случае проще моделировать участок электропередачи с целью получения вектора удаленной точки. Угол между векторами $\underline{U_{n'2}}$ и $\underline{U_{n''2}}$ в соответствии с рис. 6,б и (12) определяется как

$$\delta_{n'2n''2} = \delta_{1-\alpha'2} - \delta_{1-\alpha''2}. \quad (17)$$

Если вектор напряжения известен, его аргумент определяется как арктангенс отношения мнимой составляющей к действительной составляющей вектора (ввиду громоздкости выражения оно здесь не приводится).

Рассмотрим качественную картину изменения этого угла и, в частности, его характерные точки при $\delta = 0$ и $\delta = 180^\circ$, а также в моменты $\delta_{n'2n''2} = 0$ и 180° . Наиболее просто изменение угла

$\delta_{n'2n''2}$ можно исследовать путем сравнения с этим же углом при $\alpha_2' = \alpha$ и $\alpha_2'' = 1$, т. е. с углом $\delta_{1-\alpha}$ между вектором напряжения в точке отбора и вектором E_2 . При этом $\delta_{n'2n''2}$ является частью угла $\delta_{1-\alpha}$, характер изменения которого в цикле асинхронного хода достаточно легко определить:

$$\delta_{1-\alpha} = \arg \underline{U_n} = \arctg \frac{(1 - \alpha)k \sin \delta}{\alpha + (1 - \alpha)k \cos \delta} - \varphi_{1+\alpha M}, \quad (18)$$

а угол δ_α , дополняющий $\delta_{1-\alpha}$ до δ , определяется как

$$\delta_\alpha = \arctg \frac{\alpha \sin \delta}{(1 - \alpha)k + \alpha \cos \delta} + \varphi_{1+\alpha M}. \quad (19)$$

При отсутствии отбора мощности $\varphi_{1+\alpha M} = 0$ и, следовательно, для электропередачи с отбором мощности угол $\delta_{1-\alpha}$ может быть построен, как этот же угол для электропередачи без отбора мощности $\delta'_{1-\alpha}$, но измененный на $-\varphi_{1+\alpha M}$:

$$\delta_{1-\alpha} = \delta'_{1-\alpha} - \varphi_{1+\alpha M}. \quad (18a)$$

Для принятого диапазона изменения режимных параметров величина $\varphi_{1+\alpha M}$ положительна и достаточно мала (до 12°).

Из (15б) следует, что $k = \alpha'_{\text{ЭЦК}} / (1 - \alpha'_{\text{ЭЦК}})$, поэтому $\alpha > (1 - \alpha)k$

для $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ и $\alpha < (1 - \alpha)k$ для $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$. Следовательно, угол $\delta_{1-\alpha}$ по (18) меняется в цикле асинхронного хода в пределах:

при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ (рис. 10, а)

$$\delta'_{1-\alpha} - \varphi_{1+\alpha M} \geq \delta_{1-\alpha} \geq -\delta'_{1-\alpha} - \varphi_{1+\alpha M}, \quad (20)$$

где $0^\circ \leq \delta'_{1-\alpha} \leq 90^\circ$;

при $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ (рис. 10, б)

$$180^\circ - \varphi_{1+\alpha M} \geq \delta_{1-\alpha} \geq -180^\circ - \varphi_{1+\alpha M}, \quad (20a)$$

так как $0^\circ \leq |\delta'_{1-\alpha}| \leq 180^\circ$.

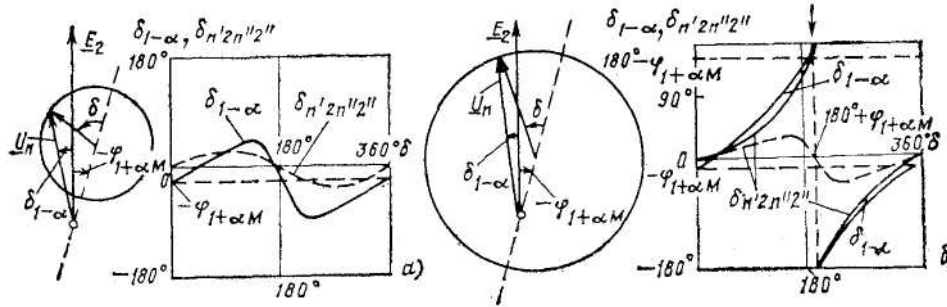


Рис. 10. Изменение угла между векторами:
а — при $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$; б — при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$

Из (18), (19) и рис. 9 следует, что в момент $\delta=0$ угол $\delta_{1-\alpha} = -\varphi_{1+\alpha M}$, а в момент $\delta=180^\circ$ $\delta_{1-\alpha} = -\varphi_{1+\alpha M}$ при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ и $\delta_{1-\alpha} = 180^\circ - \varphi_{1+\alpha M}$ при $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ (см. рис. 10).

Углы δ , соответствующие $\delta_{1-\alpha}=0$ и 180° , равны и имеют два значения, определяемые из (18), (19) уравнениями¹:

$$\delta_1 = \arcsin \frac{\alpha \sin \varphi_{1+\alpha M}}{(1-\alpha)k} + \varphi_{1+\alpha M}; \quad (21)$$

$$\delta_2 = 180^\circ - \arcsin \frac{\alpha \sin \varphi_{1+\alpha M}}{(1-\alpha)k} + \varphi_{1+\alpha M}. \quad (21a)$$

Если выполняется (20), то (21) и (21a) определяют угол δ при $\delta_{1-\alpha}=0$ (угол $\delta_{1-\alpha}$ дважды в цикле асинхронного хода равен 0); если выполняется (20a), то (21) и (21a) определяют угол δ при $\delta_{1-\alpha}=0$ и 180° соответственно. Особой точкой электропередачи является точка п с $\alpha = \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ (отбор в ЭЦК): в этом случае $\alpha_{\text{ЭЦК}} = \alpha'_{\text{ЭЦК}}$,

чему соответствует $\delta_{1-\alpha} = 0$, а решению соответствует $\delta_2 = 180^\circ$

$$\delta_1 = 2\varphi_{1+\alpha M},$$

уже множество значений угла $\delta_{1-\alpha}$ в диапазоне $-\varphi_{1+\alpha M} \pm 90^\circ$. Из (21) и (21a) видно, что при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ и выполнении условия $\alpha \sin \varphi_{1+\alpha M} > (1-\alpha)k$ угол $\delta_{1-\alpha}$ не может принять значений 0 и 180° .

Действительно, из (10) следует, что при достаточно больших α слагаемое $(1 - \alpha)ke^{j\delta}$ может оказаться настолько малым, что обусловит колебания U_n в диапазоне $\delta_{1-\alpha} < |\varphi_{1+\alpha M}|$, т. е. вне вектора E_2 (см. рис. 10). Помимо того, (21a) показывает, что при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ угол $\delta_2 < 180^\circ$, а при $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ $\delta_2 > 180^\circ$. Можно показать, что значения $\delta_{n'2n''2} = 0$ и 180° совпадают соответственно со значениями $\delta_{1-\alpha} = 0$ и 180° . Поскольку условию размещения точки отбора мощности за ЭЦК при нулевом отборе $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ соответствует $\alpha_{\text{ЭЦК}} < \alpha$, а условию $\alpha < \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ соответствует $\alpha_{\text{ЭЦК}} > \alpha$, то при $\alpha >$

¹ Вывод опущен.

$\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$ угол $\delta_{n'2n''2}$ колеблется в цикле асинхронного хода в меньшем диапазоне, чем $\delta_{1-\alpha}$ (см. рис. 10,б), а при (см.

рис. 10,а) возможны два случая:

- а) контролируемые точки располагаются по одну сторону от $\alpha_{\text{ЭЦК}}$, при этом угол $\delta_{n'2n''2}$ колеблется как при $\alpha > \alpha'_{\text{ЭЦК}}$;
- б) контролируемые точки располагаются по разные стороны от $\alpha_{\text{ЭЦК}}$ - угол $\delta_{n'2n''2}$ меняется от 0 до 360° .

Закономерности и особенности изменения угла между векторами напряжения двух контролируемых точек электропередачи в цикле асинхронного хода показывают, что выявить АР можно также и путем фиксации проворота указанных векторов напряжения относительно друг друга при размещении контролируемых точек по разные стороны от ЭЦК, а при их размещении по одну сторону от ЭЦК — путем фиксации перехода их взаимного угла примерно через 0 ($-\varphi_{1+\alpha M}$) при одновременном выполнении дополнительного условия, характеризующего зону углов $\delta \approx 180^\circ$. Такими условиями могут быть, например, увеличение тока сверх расчетной величины, снижение напряжения в точке близ ЭЦК или сопротивления на зажимах реле ниже расчетной величины. В качестве иллюстрации на рис. 10 приведены зависимости $\delta_{1-\alpha}$ и $\delta_{n'2n''2}$ от угла δ для диапазона $0 < \varphi_{1+\alpha M} < 90^\circ$. Характеристика $\delta_{n'2n''2}$, показанная сплошной линией, соответствует размещению контролируемых точек n'_2 и n''_2 по разные стороны от ЭЦК, а показанная штриховой линией — их размещению по одну сторону от него. Для случая отсутствия промежуточного отбора мощности отмеченные выше особенности изменения напряжения становятся более наглядными. На рис. 11 приведены для этого случая наиболее интересные зависимости.

Изменение взаимного скольжения. При синхронных качаниях взаимное скольжение E_1 и E_2 (s_{12} — скольжение E_1 относительно E_2) периодически изменяет знак, колеблясь около нуля. При АР происходит непрерывное увеличение взаимного угла δ и поэтому s_{12} сохраняет знак постоянным. Поскольку s_{12} затруднительно контролировать, возникает вопрос о возможности косвенного суждения о нем по скольжению между векторами напряжения двух промежуточных точек, например $\underline{U}_{n'2}$ и $\underline{U}_{n''2}$, которое определяется выражением

$$\begin{aligned} s_{n'2n''2} &= \frac{d(\delta_{1-\alpha'2} - \delta_{1-\alpha''2})}{dt} = \left(\frac{d\delta_{1-\alpha'2}}{d\delta} - \frac{d\delta_{1-\alpha''2}}{d\delta} \right) \frac{d\delta}{dt} = \\ &= \left(\frac{d\delta_{1-\alpha'2}}{d\delta} - \frac{d\delta_{1-\alpha''2}}{d\delta} \right) s_{12}. \end{aligned} \quad (22)$$

С учетом (18), (19) и (12) после дифференцирования и преобразований можно получить в общем виде

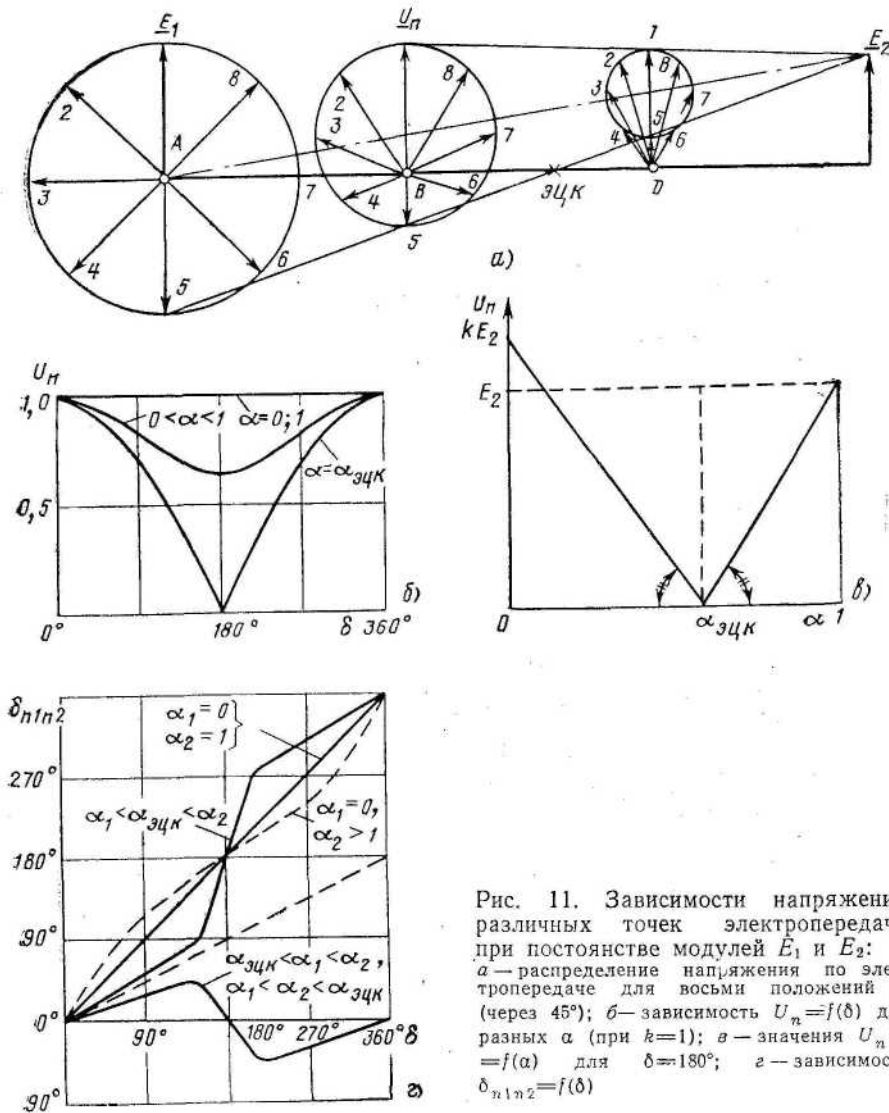


Рис. 11. Зависимости напряжения различных точек электропередачи при постоянстве модулей E_1 и E_2 : а — распределение напряжения по электропередаче для восьми положений E_1 (через 45°); б — зависимость $U_n = f(\delta)$ для разных α (при $k=1$); в — значения $U_n = f(\alpha)$ для $\delta=180^\circ$; г — зависимости $\delta_{n1n2} = f(\delta)$

$$S_{n'2n''2} = \left(\frac{\cos \delta_{s'2} + A'_2}{2 \cos \delta_{s'2} + A'_2 + 1/A'_2} - \frac{\cos \delta_{s''2} + A''_2}{2 \cos \delta_{s''2} + A''_2 + 1/A''_2} \right) S_{12}, \quad (22a)$$

где

$$\delta_{s'2} = \delta - \varphi_{\alpha'2}; \quad \varphi_{\alpha'2} = \arctg \frac{\alpha (\alpha_2' - \alpha) M \sin \varphi_M}{\alpha_2' (1 - \alpha) + \alpha (\alpha_2' - \alpha) M \cos \varphi_M};$$

$$A_2' = \frac{(1 - \alpha) (1 - \alpha_2') k}{| (1 - \alpha) \alpha_2' + \alpha (\alpha_2' - \alpha) M |}.$$

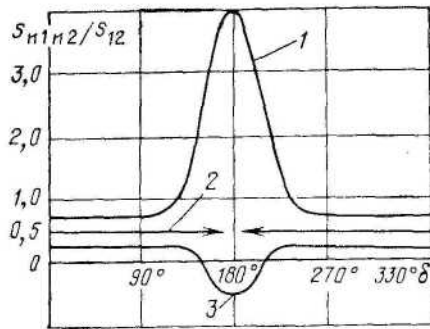


Рис. 12. Изменение взаимного скольжения S_{n1n2} , отнесенного к s_{12} :
 1 — при $\alpha_1 < \alpha_{\text{ЭЦК}} < \alpha_2$; 2 — при $\alpha_1 = \alpha_{\text{ЭЦК}}$, $\alpha_2 = 1$; 3 — при $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_{\text{ЭЦК}}$ и $\alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_{\text{ЭЦК}}$

Анализ (22а) показывает, что величина S_{n1n2} существенно зависит от удаленности векторов напряжения от ЭЦК. Можно показать, что среднее за период асинхронного хода значение частоты напряжения на участке электропередачи между E_1 и ЭЦК равно частоте E_1 (f_1), а на участке между E_2 и ЭЦК — частоте E_2 (f_2); в ЭЦК изменение частоты от f_1 до f_2 и обратно происходит скачком.

Можно показать также, что в течение цикла асинхронного хода зависимость $S_{n1n2}/s_{12} = f(\delta)$ при размещении контролируемых точек n_1 и n_2 по одну сторону от ЭЦК дважды меняет свой знак, а при размещении по разные стороны от ЭЦК — не меняет своего знака. Как иллюстрация на рис. 12 приведены указанные зависимости при отсутствии отбора мощности. Наличие отбора скажется на смещении начала отсчета на угол φ_{α}' , но не на характере зависимостей; несущественность отличия зависимостей иллюстрируется одинаковым характером изменения угла δ при отсутствии отбора мощности (рис. 11, г) и при его наличии (см. рис. 10).

Анализ закономерности изменения взаимного скольжения векторов напряжения двух контролируемых точек электропередачи показывает, что АР может быть выявлен по неизменности знака указанного скольжения в течение расчетного времени, а также путем фиксации знака скольжения при выполнении дополнительного условия, характеризующего зону $\sim 180^\circ$. Известен способ выявления момента наступления АР — перехода взаимного угла через его критическое значение — по изменению знака производной взаимного скольжения при выполнении дополнительного условия (например, при пониженном относительно номинального значении напряжения). Однако здесь он не анализируется ввиду имеющихся ограничений области его применения [10].

Изменение сопротивления на зажимах реле. Сопротивление на зажимах реле сопротивления определяется как частное от деления напряжения в контролируемой точке на ток. В случае подведения к реле напряжения U_n и тока I_1 (см. рис. 6) оно может быть записано с учетом (10) и (4) как

$$\underline{Z}_{p1n} = \frac{\underline{U}_n}{\underline{I}_1} = \underline{p}_{1n} + \underline{R}_{1n} e^{j\Phi_{1n}}, \quad (23)$$

где

$$\underline{p}_{1n} = \left(-\alpha + \frac{1 + \alpha M}{1 + \underline{M}} - \frac{|1 + \underline{M}|^2 k^2}{|1 + \underline{M}|^2 k^2 - 1} \right) \underline{Z}_{\text{ЭК}},$$

$$\underline{R}_{1n} = \frac{1 + \alpha M}{(1 + \underline{M})^2} - \frac{|1 + \underline{M}|^2 k}{|1 + \underline{M}|^2 k^2 - 1} \underline{Z}_{\text{ЭК}};$$

$$\Phi_{1n} = -\delta - 2 \operatorname{arctg} \frac{\sin(\delta + \varphi_{1+M})}{(1 + \underline{M})k - \cos(\delta + \varphi_{1+M})};$$

для промежуточной точки n'' , отстоящей на $\Delta Z_{\text{ЭК}}$ от точки отбора (см. рис. 6),

$$Z_{p1n1} = Z_{p1n} + \Delta Z_{\text{ЭК}}$$

Структура (23) показывает, что годографом Z_{p1n} является окружность радиусом R_{1n} с центром, смещенным относительно начала координат на вектор p_{1n} , годограф Z_{p1n1} имеет дополнительное смещение на вектор $\Delta Z_{\text{ЭК}}$.

Экстремальные значения Z_{p1n} определяются, очевидно, следующими условиями.

Максимальное значение $Z_{p1n} \max$ наступает при

$$\Phi_{1n} = \arg \underline{p}_{1n} - \arg \underline{R}_{1n},$$

чему соответствуют

$$\arg \underline{p}_{1n} = \operatorname{arctg} \frac{k^2(1 - \alpha)M \sin \varphi_M}{\alpha(k^2 |1 + \underline{M}|^2 - 1) - k^2[1 + \alpha M^2 + (1 + \alpha)M \cos \varphi_M]},$$

$$\arg \underline{R}_{1n} = \operatorname{arctg} \frac{\alpha M \sin \varphi_M}{1 + \alpha M \cos \varphi_M} - 2 \operatorname{arctg} \frac{M \sin \varphi_M}{1 + M \cos \varphi_M}.$$

Минимальное значение Z_{p1nmin} наступает при

$$\Phi_{1n} = -\arg \underline{p}_{1n} - \arg \underline{R}_{1n}.$$

Если известна величина M , для заданных граничных значений R можно определить, при каких значениях δ достигаются экстремальные значения Z_{p1n} и каково минимальное отношение Z_{p1nmax}/Z_{p1nmin} , что может оказаться полезным при оценке в конкретных условиях действия реле сопротивления в цикле асинхронного хода.

При отсутствии отбора мощности ($M=0$) все выражения упрощаются, что позволяет более наглядно судить об изменениях Z_{p1n} в цикле асинхронного хода. Так, геометрическим местом центров S_δ годографа сопротивления Z_{p1n} для различных R и α (рис. 13) является прямая, проходящая через начало координат и совпадающая по направлению с вектором $Z_{\text{ЭК}}$ (отрезок BA), в ее части, лежащей вне отрезка BA (рис. 13,а). В пределе при $R=\infty$ ($E_2 = 0$) центр окружности совпадает с точкой B , а при $R=0$ ($E_1 = 0$) — с точкой A .

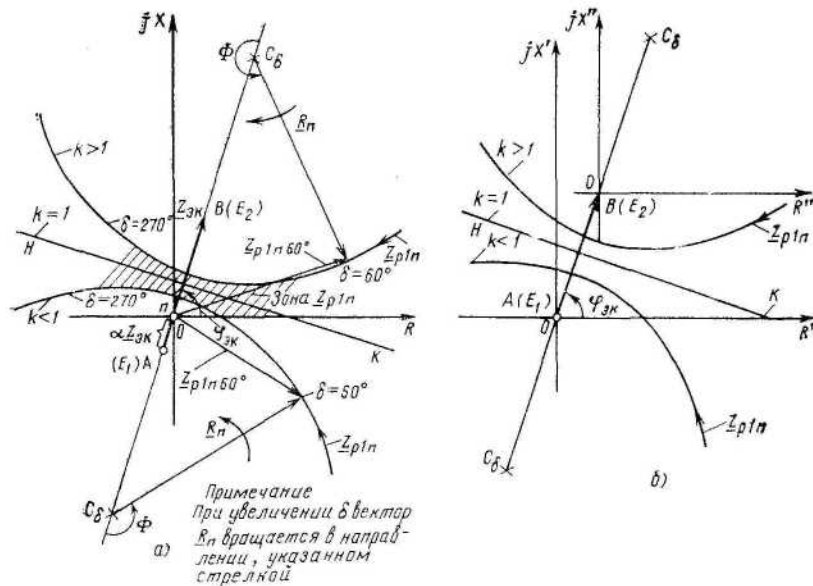


Рис. 13. Годографы $Z_{p1n} = f(\delta)$ при постоянных k и α :
 а — в точке n (при увеличении δ вектор R_n вращается в направлении, указанном стрелкой);
 б — в начале и конце электропередачи ($\alpha=0$ и $\alpha=1$)

Прямая, перпендикулярная середине отрезка BA , является годографом Z_{p1n} при $R=1$; зона существования Z_{p1n} в функции δ , R и α заключена между граничными годографами (для граничных значений R), причем изменение α отражается лишь на положении начала координат (рис. 13, б, оси $jX'R'$ и $jX''R''$), перемещающегося по вектору Z_{3K} от точки A ($\alpha=0$, оси jX' , R') до точки B ($\alpha=1$, оси jX'' , R''). Экстремальные значения модуля вектора Z_{p1n} наступают при $\delta=0$ (максимум) и $\delta=180^\circ$ (минимум), и, следовательно, с учетом $R_{\max}=1,25$ и $R_{\min}=0,8$ они определяются неравенствами $Z_{p1n0} \geq 4Z_{3K}$ и $-Z_{p1n180} \leq 0,56Z_{3K}$. Поэтому при самых неблагоприятных соотношениях α и R значение Z_{p1n} изменяется почти на порядок при изменении δ от 0 до 180° . Данное обстоятельство позволяет надежно, как правило, отличить по величине Z_{p1n} зону углов $\delta \approx 180^\circ$ от зоны $\delta \approx 0^\circ$. При наличии отбора мощности минимальное отношение экстремальных значений может быть как больше, так и меньше по сравнению со случаем отсутствия отбора мощности.

Изменение угла между напряжением и током. Угол между напряжением и током (в дальнейшем — фазовый угол φ_{zp}) может быть определен как аргумент вектора сопротивления. Например, для случая контроля U_n и I_1 он может быть записан как

$$\varphi_{zp1n} = \arg Z_{p1n} = \arg U_n - \arg I_1. \quad (25)$$

Раскрывая значения аргументов или воспользовавшись векторной диаграммой на рис. 7, получим после всех преобразований

$$\varphi_{Z_{pln}} = \varphi_{\text{ЭК}} - 90^\circ + \frac{\delta - \varphi_{1+M}}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\alpha \sin \delta}{(1-\alpha)k + \alpha \cos \delta} + \operatorname{arctg} \left(\frac{k |1+M| - 1}{k |1+M| + 1} \operatorname{ctg} \frac{\delta + \varphi_{1+M}}{2} \right), \quad (25a)$$

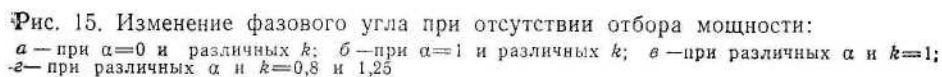
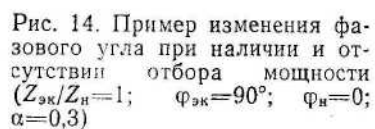
имея в виду, что φ_{Z_p} положителен, когда вектор тока, отстает от вектора напряжения. Для промежуточной точки n_1 , отстоящей от точки отбора на $\Delta Z_{\text{ЭК}}$, с учетом (24) фазовый угол определяется выражением

$$\varphi_{Z_{pln1}} = \operatorname{arctg} \frac{\Delta Z_{\text{ЭК}} \sin \varphi_{\text{ЭК}} + Z_{pln} \sin \varphi_{Z_{pln}}}{\Delta Z_{\text{ЭК}} \cos \varphi_{\text{ЭК}} + Z_{pln} \cos \varphi_{Z_{pln}}}. \quad (26)$$

На рис. 14 в качестве примера приведены зависимости: $\varphi_{Z_{pln}}$ при наличии отбора (сплошной линией) и при отсутствии отбора: мощности (штриховой линией) в функции угла δ для двух частных случаев ($\alpha = 0,3$, $\varphi_{\text{ЭК}} = 90^\circ$, $\varphi_n = 0$ при $R = 1,25$ и $R = 0,8$). Заметим, что фазовый угол может изменяться в цикле асинхронного хода как от 0 до 360° , так и в пределах, меньших 90° ; при этом, соблюдается правило: если угол проходит значение 180° , то его колебания происходят с амплитудой $\pm 180^\circ$.

Для случая отсутствия отбора мощности на рис. 15 приведены зависимости $\varphi_{Z_{pln}}$ от угла δ для характерных значений коэффициентов α и R ($\alpha < \alpha_{\text{ЭК}}$, $\alpha > \alpha_{\text{ЭК}}$, $R > 1$, $R < 1$, $R = 1$); под R в данном случае подразумевается отношение U_n/E_2 при $\alpha < \alpha_{\text{ЭК}}$ и отношение E_1/U_n при $\alpha > \alpha_{\text{ЭК}}$. На рис. 15,а показаны фазовые соотношения между I_1 и E_1 (при $\alpha = 0$). По мере перемещения контролируемой точки n ближе к ЭЦК в зависимости от α меняется коэффициент R до 0 или до ∞ , однако характер изменения фазовых соотношений такой же, как и при $\alpha = 0$ или $\alpha = 1$. После перехода за ЭЦК характер соотношений меняется и соответствует уже соотношению между вектором того же тока и вектором напряжения второго конца, в пределе — углу между I и E_2 или I_2 и E_1 . Этому случаю соответствуют кривые, показанные на рис. 15,б. При размещении контролируемой точки до ЭЦК зависимость $\varphi_{Z_{pln}}$ по-прежнему проходит через те же начальные точки: при $\delta = 0$ (360°) и 180° . При размещении контролируемой точки за ЭЦК ($\alpha > \alpha_{\text{ЭК}}$) характер изменения кривых подобен характеру изменения $\varphi_{Z_{pln}}$ при $\alpha = 1$. Это означает, что в момент $\delta = 180^\circ$ измеряемый угол $\varphi_{Z_{pln}}$ не будет равен углу $\varphi_{\text{ЭК}}$, как это?

$\varphi_{Z_{pln}}$



имеет место в случае размещения точки n до ЭЦК, а будет равен $180^\circ + \varphi_{\text{ЭК}}$ (или $-180^\circ + \varphi_{\text{ЭК}}$). Следовательно, характер изменения $\varphi_{\text{зпн}}$ будет уже другой, чем на рис. 15,а (амплитуда колебаний фазового угла при этом будет 180 либо 360°). На рис. 15,в, г доказаны зависимости для нескольких промежуточных значений α при разных R .

С учетом изложенного можно сделать следующие выводы:

а) при отсутствии отбора мощности фазовый угол, измеряемый близ

точки отбора мощности (независимо от того, с какой стороны от него), в момент $\delta = 180^\circ$ равен своему значению при $\delta = 0$ или отличается от него на $\pm 90^\circ$ при $R = l$ и на $\pm 180^\circ$ при $R \neq l$:

$$\varphi'_{Zp180} = \varphi'_{Zp0} \pm n90^\circ = \varphi_{ЭК} \pm n90^\circ, \quad (27)$$

где $n=0, 1, 2$;

б) при наличии отбора мощности условие (27) не выполняется и для рассматриваемого диапазона изменения режимных параметров

$$\varphi'_{Zp180} - \varphi_{Zp180} = -\operatorname{arctg} \frac{k |1 + \underline{M}| \sin \varphi_M}{1 + k |1 + \underline{M}| \cos \varphi_M} > 0; \quad (28)$$

в) при больших отборах мощности амплитуда колебаний фазового угла в цикле асинхронного хода может быть достаточно малой, уменьшаясь с увеличением $Z_{ЭК}/Z$ и R .

Приведенные обстоятельства показывают, что для одного (любого) режима момент перехода угла δ из диапазона $\sim 0 \div 180^\circ$ в диапазон $\sim 180 \div 360^\circ$ (0) может быть определен по переходу фазового угла из одной определенной части его диапазона в другую часть, тоже определенную; причем для отличия момента наступления АР, с которым ассоциируется переход угла δ через $\delta_{кр}$ ($\sim 180^\circ$), этот переход должен фиксироваться при дополнительном условии, характеризующем зону углов $\delta_{кр}$. При отсутствии отбора мощности границами диапазона изменения фазового угла в любом случае будут его значения $\varphi_{ЭК}$ и $\varphi_{ЭК} + n90^\circ$ [см. (27)].

Изменение мощности. В связи с использованием в делительных устройствах, установленных в ЭЭС, реле активной и реактивной мощности рассмотрим в отдельности зависимости активной и реактивной мощностей от взаимного угла в цикле асинхронного хода.

Мощности, направленные к точке отбора со стороны E_1 могут быть представлены после соответствующих преобразований [11] зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} P_{1n} &= \frac{P_{E2}}{|1 + \underline{\alpha M}|^2} [K_{1n} + H_{1n} \sin(\delta + \varepsilon_{P1n})]; \\ Q_{1n} &= \frac{P_{E2}}{|1 + \underline{\alpha M}|^2} [C_{1n} + D_{1n} \sin(\delta + \varepsilon_{Q1n})], \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
& \text{где } P_{E2} = E_2^2 / Z_{\Sigma K}; \quad K_{1n} = [-\alpha + (1-\alpha)k^2] \cos \varphi_{\Sigma K} + (1-\alpha)k^2 M \cos \varphi_H; \\
& H_{1n} = \\
& = k \sqrt{1 + \alpha^2 M^2 - 4\alpha(1-\alpha) \cos^2 \varphi_{\Sigma K} + 4\alpha^2 M \cos \varphi_{\Sigma K} \cos \varphi_H - 2\alpha M \cos(\varphi_{\Sigma K} + \varphi_H)}; \\
& \varepsilon_{P1n} = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{(2\alpha-1) \cos \varphi_{\Sigma K} + \alpha M \cos \varphi_H}{\sin \varphi_{\Sigma K} + \alpha M \sin \varphi_H}, \\ \operatorname{arcsin} \frac{k[(2\alpha-1) \cos \varphi_{\Sigma K} + \alpha M \cos \varphi_H]}{H_{1n}}; \end{cases} \\
& C_{1n} = [-\alpha + (1-\alpha)k^2] \sin \varphi_{\Sigma K} + (1-\alpha)k^2 M \sin \varphi_H; \\
& D_{1n} = \\
& = k \sqrt{1 + \alpha^2 M^2 - 4\alpha(1-\alpha) \sin^2 \varphi_{\Sigma K} + 4\alpha^2 M \sin \varphi_{\Sigma K} \sin \varphi_H + 2\alpha M \cos(\varphi_{\Sigma K} + \varphi_H)}; \\
& \varepsilon_{Q1n} = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{(2\alpha-1) \sin \varphi_{\Sigma K} + \alpha M \sin \varphi_H}{-\cos \varphi_{\Sigma K} - \alpha M \cos \varphi_H}, \\ \operatorname{arcsin} \frac{k[(2\alpha-1) \sin \varphi_{\Sigma K} + \alpha M \sin \varphi_H]}{D_{1n}}. \end{cases}
\end{aligned}$$

Угол ε соответствует квадранту, который определяется по табл. 1.

Соответствующие выражения для любой промежуточной точки приведены в [11]. Структура выражений по (29) показывает, что угловые характеристики активной и реактивной мощностей могут быть представлены смещенными синусоидами. Значение взаимного угла между ЭДС, при котором активная мощность меняет свой знак, определяется выражением

$$\delta_{P=0,1n} = \begin{cases} -\varepsilon_{P1n} - \operatorname{arcsin} \frac{K_{1n}}{H_{1n}}, \\ -\varepsilon_{P1n} + \operatorname{arcsin} \frac{K_{1n}}{H_{1n}} + 180^\circ. \end{cases} \quad (30)$$

Если $K_{1n} > H_{1n}$, то зависимость $P_{1n} = f(\delta)$ не пересекает ось абсцисс и, следовательно, не меняет свой знак в цикле асинхронного хода и уравнение (30) не имеет решения. Угол $\delta_{P=0,1n}$, соответствующий $P_{p1n} = 0$, может быть как меньше 180° (360°), так и больше 180° (0°). Поэтому зоны углов δ , соответствующие зонам $P_{1n} > 0$ и $P_{1n} < 0$, могут быть не равны, причем края этих зон, т. е.

Таблица 1. Определение квадранта

arctg	arcsin ε	
	>0	<0
>0	I квадрант	III квадрант
<0	II квадрант	IV квадрант

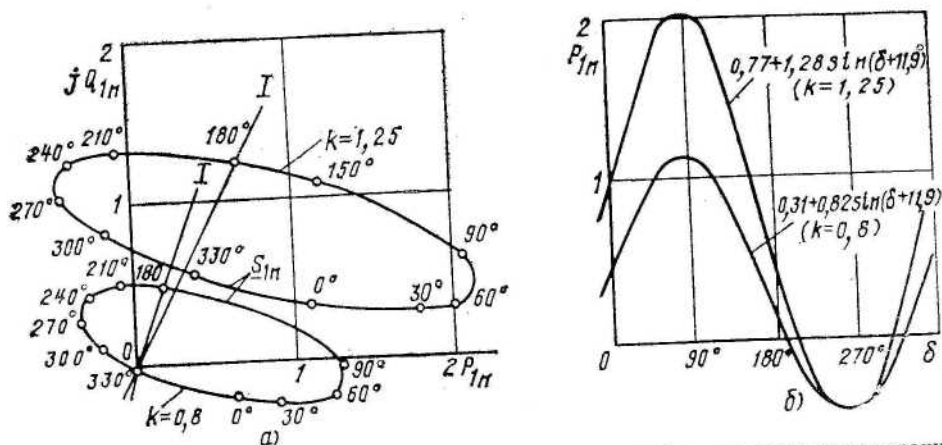


Рис. 16. Пример изменения мощности в контролируемой точке электропередачи при наличии отбора мощности ($Z_{\text{эк}}/Z_n=1$; $\varphi_{\text{эк}}=90^\circ$; $\varphi_n=0^\circ$; $\alpha=0,3$; $k=1,25$ и $0,8$): а — годографы $S_{1n}=f(\delta)$; б — зависимость $P_{1n}=f(\delta)$

углы $\delta r_{0,1n}$ смещаются несимметрично относительно $\delta = 90^\circ$ [11]. Очевидно, что в силу симметричности синусоиды экстремальные значения P_{1n} определяются серединами указанных зон. При наличии отбора

мощности смещает зависимость $P_m = f(\delta)$ в $\alpha < \alpha_{\text{ЭК}}$ сторону положительных, а при $\alpha > \alpha_{\text{ЭК}}$ в сторону отрицательных значений.

В общем случае годограф вектора полной мощности ($S=P + jQ$), измеряемой в месте установки реле мощности, при изменении угла является эллипсом. В качестве примера на рис. 16 приведены зависимости $P_{1n} = f(\delta)$ и годографы $S_{1n} = f(\delta)$ для двух расчетных случаев (их значения даны в относительных единицах, $P_{\text{баз}}=P_{\text{Е2}}$)

Особенности изменения годографа мощности в цикле асинхронного хода позволяют выявить момент наступления АР, если есть возможность зафиксировать переход указанного годографа из диапазона углов $\sim 0 < \delta < 180^\circ$ в диапазон $\sim 180^\circ < \delta < 360^\circ$ при выполнении дополнительного условия, характеризующего зону $\delta \approx 180^\circ$. Эти условия могут быть обеспечены при использовании в устройстве АЛАР реле мощности с соответствующей настройкой характеристики срабатывания (например, линии 0 — 1 на рис. 16) и реле тока (напряжения или сопротивления).

В заключение отметим, что для двухмашинной схемы ЭЭС со сложной и неоднородной сетью с промежуточными отборами мощности, но при замещении всех ее элементов неизменными сопротивлениями характер годографов векторов в функции угла δ остается тот же, что и при принятых первоначально допущениях; при этом первые отличаются от вторых величиной смещения, размером и конфигурацией самих годографов. В общем случае экстремальные за цикл асинхронного хода значения рассмотренных здесь режимных параметров, за исключением напряжения в точке

отбора мощности, не соответствуют углам $\delta = 0, 90$ и 180° в отличие от случая, когда отсутствует отбор мощности.

Таким образом, приведенные особенности изменения некоторых режимных параметров в цикле асинхронного хода и их более подробное исследование [10—12] позволяют сформулировать несколько обобщенных способов выявления АР (по факту перехода угла δ через 180°); большинство из них реализовано в устройствах АЛАР, эксплуатируемых в СССР (см. § 3). Каждый из способов характеризуется определенной закономерностью — переходом режимного параметра из одной полуплоскости значений в другую в моменты $\delta \approx 0$ и 180° . Этот переход должен фиксироваться выявительным органом (ВО). Селективность выявления АР по этим способам может быть обеспечена лишь при возможности надежной отстройки значения дополнительно контролируемого параметра при $\delta \approx 180^\circ$ от его значения при $\delta \approx 0^\circ$. Надежность выявления АР может быть обеспечена лишь при надежной фиксации дополнительно контролируемого параметра при $\delta \approx 180^\circ$. Такая фиксация должна осуществляться пусковым органом (ПО). Совокупность ВО и ПО называют обычно выявителем асинхронного режима.

3. ТИПОВЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

Оценка работоспособности пускового и выявительного органов. Обеспечение селективной настройки ПО и ВО устройств АЛАР как типовых, так и тем более простейших нетиповых делительных устройств [7, 8] часто затруднительно. Поэтому оценим принципиальные возможности этих органов.

С целью определения области применения ПО как датчика зоны $\delta \approx 180^\circ$, их сравнительной оценки по чувствительности и, как следствие, выработки рекомендаций по выбору ПО применительно к конкретным условиям их работы при АР рассмотрим предельные значения дополнительно контролируемых параметров, обеспечивающих отстройку выявителя АР при $\delta \approx 0$ и его надежную работу при $\delta \approx 180^\circ$.

Для упрощения анализа примем, что экстремальные значения дополнительно контролируемых параметров соответствуют углам δ , мало отличающимся от 0 до 180° , а режимные параметры, используемые для выявления момента нарушения устойчивости, изменяют свой знак тоже при $\delta \approx 0$ и 180° . Тот факт, что эти условия не всегда соблюдаются и существуют отклонения от указанных величин (см. § 2), ухудшает условия выявления АР и это должно, конечно, учитываться при оценке результатов анализа.

Как уже упоминалось, в качестве дополнительных условий, характеризующих зону $\delta \approx 180^\circ$, могут рассматриваться: снижение напряжения в контролируемой точке ниже заданного ($U_{с,р}$ — напряжение срабатывания реле минимального напряжения); увеличение тока выше

заданного ($I_{с,р}$ — ток срабатывания реле максимального тока); снижение сопротивления на зажимах реле ниже заданного ($Z_{с,р}$ — сопротивление срабатывания реле сопротивления).

Пусковой орган по напряжению. Условие отстройки реле от максимального значения напряжения в точке n_1 в цикле асинхронного хода отображается неравенством

$$U_{с,р} \leq \frac{U_{n1,0 \min}}{k_H k_B},$$

а условие надежной работы реле —

$$U_{с,р} \geq k_{qU} U_{n1,180 \max},$$

неравенством или с учетом (13)

$$U_{с,р} \leq \frac{1}{k_H k_B} \left\{ \frac{E_2 [\alpha_1 + |1 - \alpha_1 + (\alpha - \alpha_1)M|k]}{|1 + \alpha M|} \right\}_{\min}; \quad (31)$$

$$U_{с,р} \geq k_{rU} \left\{ \frac{E_2 [\alpha_1 - |1 - \alpha_1 + (\alpha - \alpha_1)M|k]}{|1 + \alpha M|} \right\}_{\max}, \quad (32)$$

где $R_B (>1)$ — коэффициент возврата минимального реле напряжения; R_H — коэффициент надежности; $R_{ч}$ — коэффициент чувствительности из условия обеспечения надежного срабатывания реле напряжения.

Для случая отсутствия отбора мощности эти неравенства упрощаются:

$$k_{qU} E_2 [\alpha - (1 - \alpha)k] \leq U_{с,р} \leq \frac{E_2 [\alpha + (1 - \alpha)k]}{k_H k_B}.$$

Параметры неравенств (31) и (32) должны быть взяты из разных режимов, обуславливающих соответственно минимум и максимум правых частей этих неравенств.

Заметим, что моделирование контролируемого вектора напряжения (путем использования фантомной схемы) позволяет выбрать его оптимальным образом и, следовательно, позволяет улучшить условия функционирования ПО.

Пусковой орган по току. Условия отстройки от минимального тока в цикле асинхронного хода и надежной работы реле максимального тока с учетом (4) могут быть представлены неравенствами

$$I_{с,р} \geq \frac{k_H}{k_B} \left\{ \frac{E_2}{Z_{ЭК \min}} \frac{|k| |1 + \underline{M}| - 1|}{|1 + \underline{M}|} \right\}_{\max}; \quad (33)$$

$$I_{с,р} \leq \frac{1}{k_{qI}} \left\{ \frac{E_2}{Z_{ЭК \max}} \frac{k |1 + \underline{M}| + 1}{|1 + \underline{M}|} \right\}_{\min}, \quad (34)$$

где k_{qI} — коэффициент чувствительности реле тока.

Для случая отсутствия отбора мощности неравенства упрощаются:

$$\frac{k_H}{k_B} \frac{E_2 |k - 1|}{Z_{ЭК \min}} \leq I_{с,р} \leq \frac{1}{k_{qI}} \frac{E_2 (k + 1)}{Z_{ЭК \max}}.$$

Параметры неравенств (33) и (34) должны быть взяты из разных режимов.

Пусковой орган по сопротивлению. Для реле сопротивления, установленного возле точки отбора мощности, условия его надежной работы и отстройки от максимального значения сопротивления в цикле асинхронного хода с учетом экстремальных значений сопротивления на зажимах реле по (23) могут быть представлены неравенствами

$$Z_{c,p} \geq k_{cz} Z_{pn180max}; \quad (35)$$

$$Z_{c,p} \leq \frac{k_H}{k_B} Z_{pn0min}, \quad (36)$$

или
$$\frac{k_H}{k_B} \{ |\underline{p}_{1n}| + |\underline{R}_{1n}| \}_{min} \geq Z_{c,p} \geq k_{cz} \{ |\underline{p}_{1n}| - |\underline{R}_{1n}| \}_{max},$$

где k_{cz} — коэффициент чувствительности реле сопротивления, а $Z_{ЭК}$, входящие в (35) и (36), имеют максимальное ($Z_{pn180max} = Z_{ЭКmax}$) и минимальное значения, соответствующие

$$(Z_{pn0min} = Z_{ЭКmin})$$

разным режимам.

Наличие отбора мощности обеспечивает в наиболее реальных режимах ($|1 + \alpha M| > 1$) уменьшение напряжения в контролируемой точке, ухудшение условий срабатывания реле максимального тока (из-за уменьшения амплитуды колебания тока в цикле асинхронного хода) и реле сопротивления.

Для случая отсутствия отбора мощности неравенства упрощаются:

$$k_{cz} \left| \frac{k}{k+1} - \alpha \right| Z_{ЭКmax} \leq Z_{c,p} \leq \frac{k_H}{k_B} \left| \frac{k}{k-1} - \alpha \right| Z_{ЭКmin}.$$

Для каждого из рассмотренных ПО неравенства, характеризующие его работу, могут быть решены совместно относительно коэффициента чувствительности. Подставив известные значения параметров в каждом конкретном случае (в рамках рассматриваемой двухмашинной схемы замещения ЭЭС), можно рассчитать коэффициент чувствительности и сделать вывод о работоспособности ПО в рассматриваемой ситуации.

Сравнительный анализ выражений (здесь опущены) для коэффициента чувствительности ПО в рассматриваемой схеме замещения ЭЭС позволяет сделать следующие выводы:

а) пусковые органы на базе реле сопротивления и реле тока принципиально работоспособны в любой точке электропередачи; при этом чувствительность ПО на базе реле тока не зависит от размещения контролируемой точки на электропередаче, а чувствительность ПО на базе реле сопротивления — зависит;

б) чувствительность ПО на базе реле минимального напряжения зависит от размещения контролируемой точки на электропередаче (увеличивается

при приближении к ЭЦК); ПО имеет более острую настройку на зону $\delta \approx 180^\circ$, чем ПО по току, но имеет ограничение области применения по α , поскольку в точках приложения ЭДС напряжение остается неизменным в цикле асинхронного хода.

Оценку влияния отбора мощности на изменение режимных параметров при АР, настройку ПО и ВО и практические рекомендации в связи с этим можно свести к следующему:

а) несовпадение максимума тока с моментом $\delta = 180^\circ$ ограничивает применение реле тока как ПО в устройстве, использующем выявительный орган с зонами работы $\delta = 0 \div 180^\circ$ и $\delta = 180 \div 360^\circ$;

б) существенное уменьшение разницы между максимальным и минимальным значениями тока в цикле асинхронного хода может ограничить применение реле тока как ПО (из-за трудности получения достаточной чувствительности в минимальном режиме);

в) возможность достижения в цикле асинхронного хода в зависимости от характера нагрузки более высокого уровня напряжения в точке отбора мощности по сравнению со случаем отсутствия отбора мощности ограничивает применение реле минимального напряжения в качестве ПО, а возможность достижения в цикле асинхронного хода более низкого уровня напряжения в точке отбора расширяет, наоборот, в этом наиболее частом случае применение реле минимального напряжения в качестве ПО;

г) достижение напряжением в точке отбора своего минимума в момент $\delta = 180^\circ$ расширяет возможность использования реле минимального напряжения в качестве ПО вместо реле тока;

д) несовпадение минимума сопротивления на зажимах реле с моментом $\delta = 180^\circ$, хотя и в меньшей степени, чем для тока, ограничивает применение реле сопротивления;

е) использование в качестве выявительного органа реле направления активной мощности может привести к излишнему срабатыванию, фиксации неправильного знака скольжения или отказу устройства; существенное улучшение характеристик указанного устройства может быть достигнуто использованием реле максимальной мощности с широко регулируемой характеристикой срабатывания в плоскости P, Q .

Принципы построения типовых устройств АЛАР, разработанных институтом «Энергосетьпроект». С учетом выявленных закономерностей были разработаны типовые устройства АЛАР, выпускаемые заводами Минэлектротехпрома в виде следующих панелей:

панель основного устройства в варианте с тремя ступенями — тип ЭПО-1074-74;

то же, но в варианте с одной ступенью — тип ЭПО-1075-74;

панель устройства с пуском по току и счетчиком циклов — тип ЭПО-1073-74;

панель резервного устройства — тип ЭПО-1076/2-82.

Первые две панели представляют собой функционально варианты так называемого основного устройства АЛАР, а другие две — варианты резервного устройства, хотя в обиходе, когда говорят о резервном устройстве АЛАР, имеют в виду панель ЭПО-1076/2-82. Помимо указанных выше устройств в качестве типовой была разработана принципиальная схема защиты от неполнофазного режима, выявляющая его и при АР, такая защита изготавливается по индивидуальному проекту

Основное устройство [13] предназначено для выявления двух-частотного АР в энергосистеме Принцип действия основан на фиксации переориентации (срабатывания или возврата) реле мощности в зоне срабатывания реле сопротивления, означающей переход угла между ЭДС двух эквивалентных генераторов через значение, близкое к максимальному критическому ($\sim 180^\circ$) по условию сохранения устойчивости параллельной работы указанных генераторов. Устройство позволяет определить знак скольжения (ускорение или торможение вектора E_1 , расположенного за «спиной» выявительного и пускового органов), выдать с учетом знака скольжения команду для выполнения противоаварийных мероприятий, способствующих ресинхронизации, в конце второго третьего или четвертого циклов асинхронного хода, фиксация которых необходима для согласования действия с другими устройствами запомнить этот факт и после дополнительной (регулируемой) выдержки времени проверить синхронность работы источников ЭДС E_1 и E_2 с выдачей команды на деление ЭЭС, если АР не прекратился, или возвратом схемы устройства, если АР прекратился При длительности цикла асинхронного хода более расчетной устройство также возвращается в исходное состояние

Резервное устройство [14] также предназначено для выявления двухчастотного АР в энергосистеме Принцип его действия основан на фиксации колебаний тока с периодом не более расчетного в течение заданного времени. Резервное устройство, как и основное, не действует, если период асинхронного хода превышает расчетное время

Основное устройство. Устройство с тремя ступенями (рис 17,а б, в) состоит из трех реле сопротивления, имеющих регулируемые по смещению, углу максимальной чувствительности и виду характеристики срабатывания, из максимального реле мощности с регулируемым углом максимальной чувствительности и мощностью срабатывания, образующего совместно с реле сопротивления выявитель АР, счетчика циклов асинхронного хода, блока определения знака скольжения, цепей фиксации АР в первом цикле, контроля периода асинхронного хода, дополнительной выдержки времени, возврат устройства, фиксации неисправности устройства, сигнализации и выходных цепей Устройство состоит из трех ступеней, имеющих каждая свои выходные цепи

Первая ступень устройства предназначена для наиболее быстрого (в первом цикле) выявления АР в контролируемом сечении и



Рис. 17. Основное устройство АЛАР. Вариант с тремя ступенями;

его знака скольжения. При возникновении в энергосистеме КЗ не исключено такое срабатывание реле мощности и сопротивления, входящих в устройство, которое приведет к ложной фиксации первого цикла асинхронного хода. Для исключения последнего в I ступени устройства применена блокировка по скорости изменения сопротивления на зажимах реле сопротивления: если она меньше

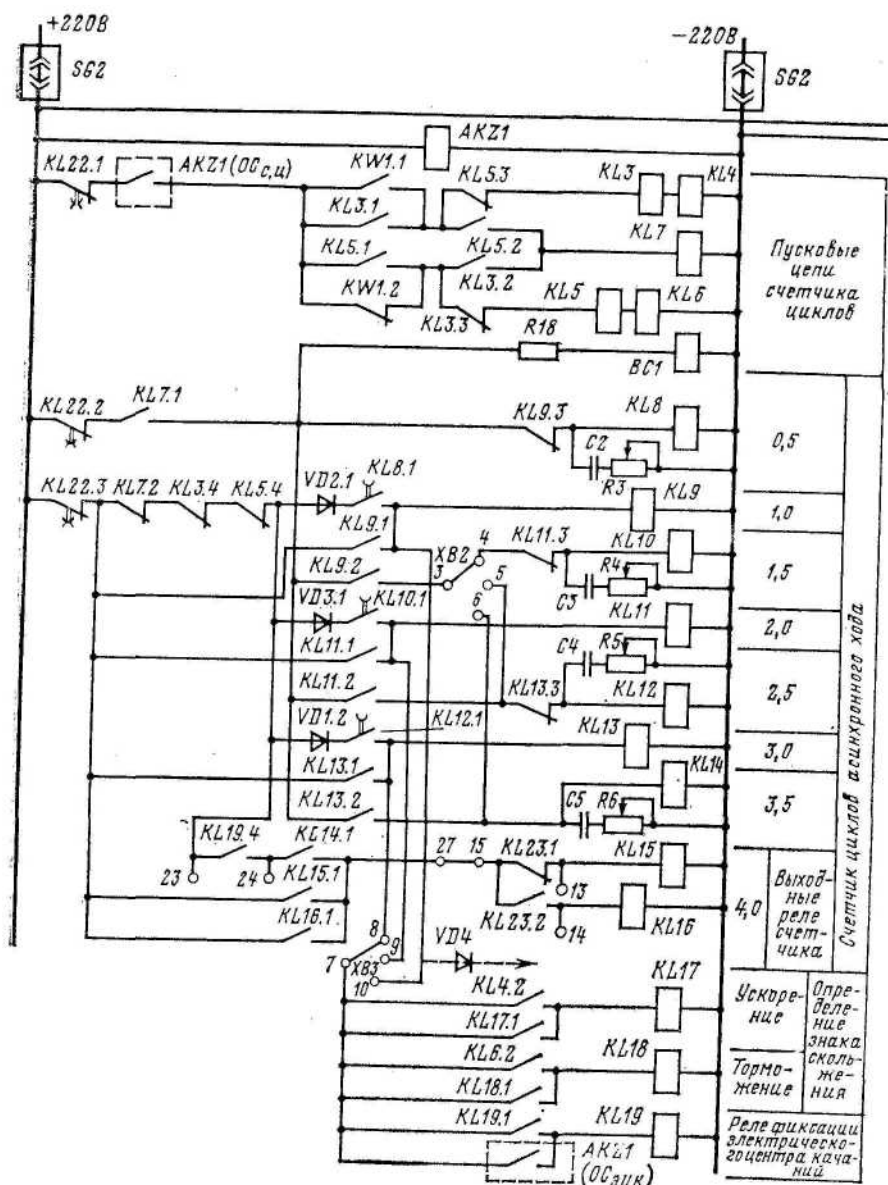


Рис. 17. Продолжение

а — принципиальная схема цепей переменного тока, цепей сигнализации и вы-
граммы

заданной величины, определяемой возможной разновременностью действия при КЗ двух реле сопротивления с разными сопротивлениями срабатывания и включенными на разные фазы, то это означает, что на контролируемой связи начались качания или АР.

Для выявления скорости изменения сопротивления на зажимах реле используются два реле сопротивления (направленных или со смещением) из комплекта КРС-2 с разными характеристиками срабатывания (чувствительное и грубое реле). Время между последовательным срабатыванием чувствительного и грубого реле,

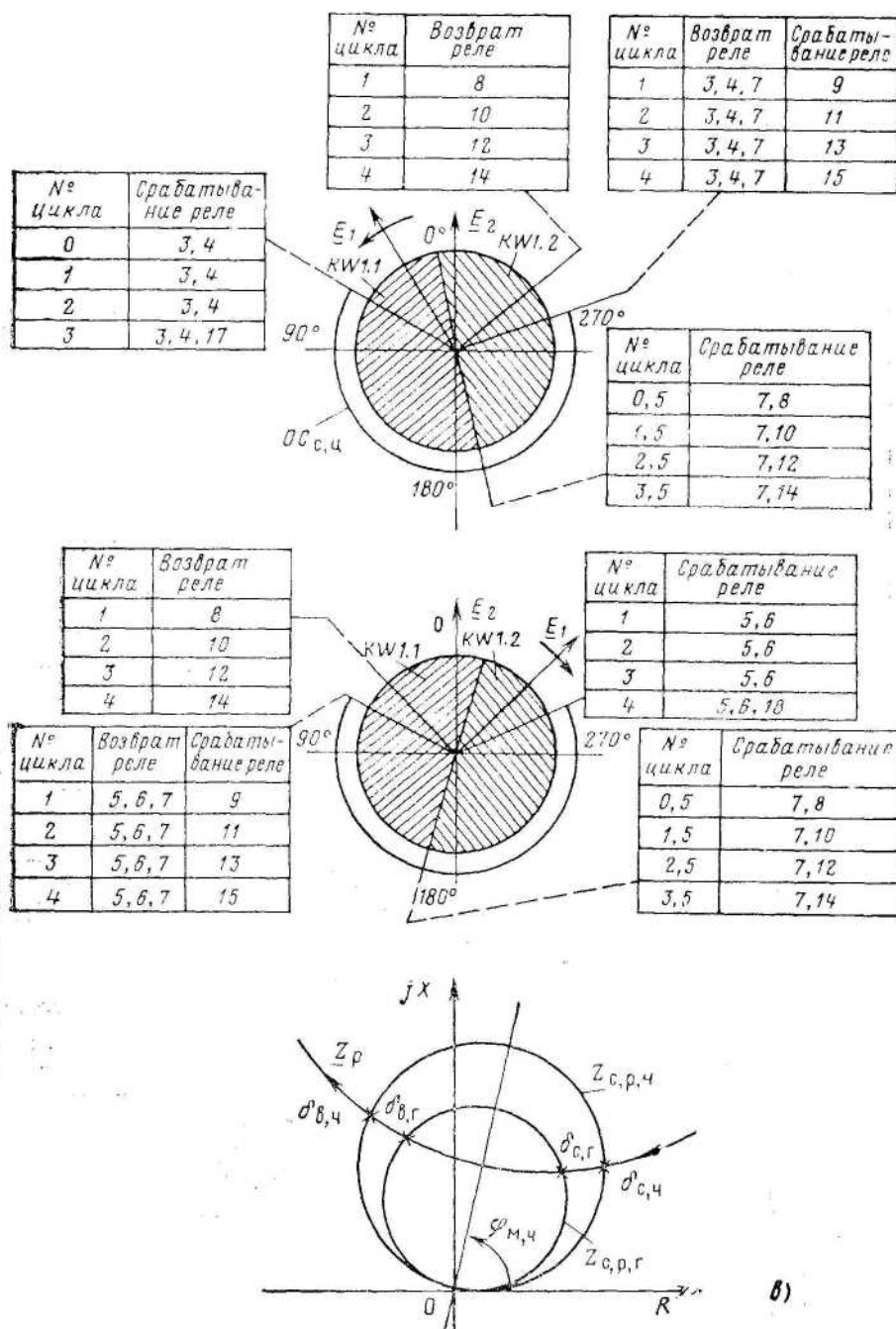


Рис. 17. Продолжение

характеризующее среднюю скорость изменения сопротивления на зажимах реле, сравнивается с заданным. Переход через максимальный критический угол фиксируется II ступенью устройства с помощью промежуточного реле, срабатывающего через 0,5 цикла асинхронного хода.

Первая ступень устройства снабжена блокировкой по напряжению обратной последовательности, предназначенной для исключения срабатывания ступени при качаниях, сопровождающихся близкими несимметричными КЗ.

При срабатывании I ступени вырабатывается один из двух сигналов: «АР с ускорением» или «АР с торможением» (см. рис. 17,а). Если устройство включено так, что контакт *K.W1.1* реле мощности замкнут при направлении активной мощности от шин в линию, то сигнал «АР с ускорением» соответствует выпадению из синхронизма с ускорением части ЭЭС, расположенной за шинами, у которых установлено устройство, относительно части ЭЭС, расположенной с противоположной стороны линии.

Поскольку I ступень по принципу своего действия не срабатывает при большой скорости изменения сопротивления, присущей КЗ, она может отказать также и при большом скольжении; при большом скольжении выявление АР должно обеспечиваться II ступенью устройства.

Вторая ступень устройства предназначена для выявления АР в контролируемом сечении и знака скольжения в конце второго, третьего или четвертого цикла. Принцип действия II ступени основан на фиксации срабатывания или возврата реле мощности в зоне срабатывания реле сопротивления. Счетчик циклов управляется реле сопротивления из комплекта КРС-2 и реле максимальной мощности с регулируемой мощностью срабатывания и углом максимальной чувствительности. Для выявления АР по заданному сечению имеется возможность контролировать ЭЦК с помощью дополнительного реле сопротивления из комплекта КРС-2. Использование блокировки действия по напряжению обратной последовательности носит здесь вспомогательный характер при основном ее назначении — сигнализировать о неисправности измерительных цепей напряжения. Одновременно с этим осуществляется вывод из работы II и III ступеней.

Чтобы исключить накопление информации о количестве зафиксированных циклов изменения контролируемых параметров, осуществляется контроль длительности каждого из контролируемых циклов. Действие II ступени устройства осуществляется в соответствии с выработкой одного из двух сигналов: «АР с ускорением» или «АР с торможением» (рис. 17,а). Исключение срабатывания II ступени при КЗ, неуспешном АПВ достигается благодаря счету циклов с контролем их длительности. Вторая ступень резервирует действие I ступени.

Третья ступень устройства предназначена для ликвидации АР после выполнения мероприятий по ресинхронизации, если в течение дополнительной выдержки времени после этого будет зафикси-

46 Таблица 2. Использование перемычек в рядах зажимов панели (рис. 17,а и б)

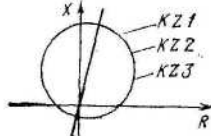
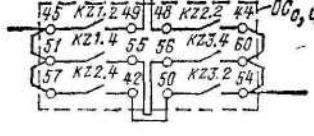
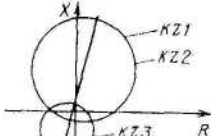
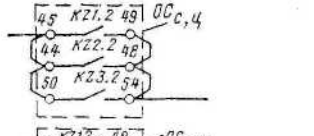
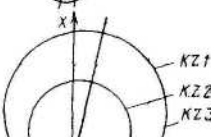
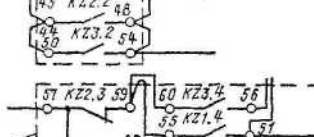
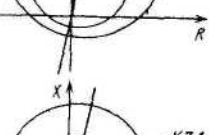
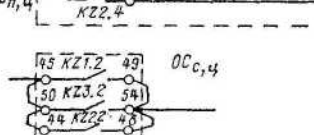
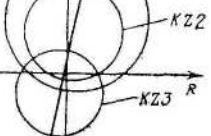
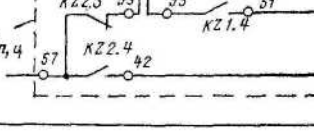
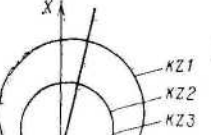
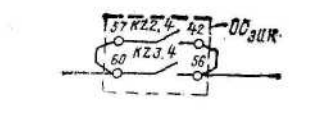
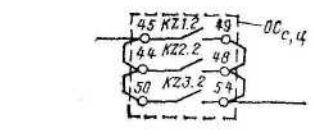
Режимы работы устройства	Перемычки устройства	
	установлены	сняты
1. Фиксация АР в I-м цикле с блокировкой по скорости изменения сопротивления:		
с фиксацией знака скольжения	1-2, 16-18 или 30-31	16-17, 30-32
без фиксации знака скольжения	1-2, 16-17 или 30-32	30-31 или 16-18
2. Фиксация АР через 2—4 цикла с контролем знака скольжения, без ресинхронизации:		
с контролем ЭЦК		
2 цикла	3-6, 7-10	3-5, 3-4, 7-9, 7-8
3 цикла	3-5, 7-9	3-6, 3-4, 7-10, 7-8
4 цикла	3-4, 7-8	3-6, 3-5, 7-9, 7-10
без контроля ЭЦК		
2 цикла	3-6, 7-10	3-5, 3-4, 7-9, 7-8
3 цикла	3-5, 7-9	3-6, 3-4, 7-10, 7-8
4 цикла	3-4, 7-8	3-6, 3-5, 7-10, 7-9

Продолжение табл. 2

Режимы работы устройства	Перемычки устройства	
	установлены	сняты
3. Фиксация АР через 2—4 цикла с контролем знака скольжения, но с выполнением ресинхронизации:		
с контролем ЭЦК		
2 цикла	3-6, 7-10	3-5, 3-4, 7-9, 7-8
3 цикла	3-5, 7-9	3-6, 3-4, 7-10, 7-8
4 цикла	3-4, 7-8	3-6, 3-5, 7-10, 7-9
без контроля ЭЦК		
2 цикла	3-6, 7-10	3-5, 3-4, 7-9, 7-8
3 цикла	3-5, 7-9	3-6, 3-4, 7-10, 7-8
4 цикла	3-4, 7-8	3-6, 3-5, 7-10, 7-9
4. Фиксация АР без контроля знака скольжения (без ресинхронизации и с ней) через 2, 3 или 4 цикла	20-25, 22-26 (дополнительно к пп. 2 или 3)	То же, что в п. 2 или 3, кроме 20-25 и 22-26
5. Наличие взаимной блокировки с устройством, установленным на смежной ВЛ	Зажимы 1, 2, 15, 27, 28, 29 используются, как показано на рис. 17,а, б	

47 Примечание. При контроле ЭЦК только во II ступени (пп. 3, 4) устанавливается перемычка 23-24 и снимаются перемычки 19-20 и 21-22.

таблица 3. Варианты использования реле сопротивления

Варианты	Условие срабатывания устройства	Положение ЭЦК по отношению к месту установки устройства	Характеристики реле сопротивления	Способ использования контактов реле сопротивления	Назначение реле сопротивления		
					KZ1	KZ2	KZ3
1	После 2—4 циклов асинхронного хода	а) Впереди			Пусковой орган счетчика циклов		
		б) Впереди или сзади			То же		
2	После 2—4 циклов асинхронного хода и в I цикле с контролем скорости изменения сопротивления	а) Впереди			» »		
		б) Впереди или сзади			Контроль скорости (I ступень)		
					Пусковой орган счетчика циклов		
					Контроль скорости (I ступени)		
3	После 2—4 циклов асинхронного хода с контролем ЭЦК	а) Впереди			Пусковой орган счетчика циклов		
					—	Контроль ЭЦК	

Варианты	Условные срабатывания устройства	Положение ЭЦК по отношению к месту установки устройства	Характеристики реле сопротивления
3	После 2—4 циклов асинхронного хода с контролем ЭЦК	б) Впереди или сзади	
4	После 2—4 циклов и в 1-м цикле с контролем скорости изменения сопротивления, с контролем ЭЦК	а) Впереди	
		б) Впереди или сзади	

Способ использования контактов реле сопротивления	Назначение реле сопротивления		
	KZ1	KZ2	KZ3
	Пусковой орган счетчика циклов		
	—	Контроль ЭЦК	
	Пусковой орган счетчика циклов	—	Пусковой орган счетчика циклов
	Контроль скорости (I ступень)		—
	—	Контроль ЭЦК	
	Пусковой орган счетчика циклов	—	Пусковой орган счетчика циклов
	Контроль скорости (I ступень)		—
	—	Контроль ЭЦК	

Таблица 5. Расчетные формулы и схемы времязадающих цепочек

Расчетная схема	Условие выбора	Расчетные формулы	Упрощенные расчетные формулы	Примечания
	Время возврата реле $t_{\text{в}}$	$t_{\text{в}} = (R + R_{KL}) C \times$ $\times \ln \left[\frac{R_{KL}}{R_{KL} + R} \times \right.$ $\times \left. \frac{U (1 - e^{-t_{\text{н}}/(RC)})}{U_{\text{в}}} \right]$	$t_{\text{в}} = K (R + R_{KL}) C,$ где $K = 1$ при $U_{\text{в}} = 0,3U_{\text{ном}}$, $K = 3$ при $U_{\text{в}} = 0,04U_{\text{ном}}$	См. табл. 6
	Время возврата реле $t_{\text{н}}$ после срабатывания; время готовности к повторному срабатыванию $t_{\text{г}}$	—	$t_{\text{н}} = K_1 R_{KL} C, \quad t_{\text{г}} = K_2 R_{\text{раз}} C,$ где $K_1 = 1 \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} K_1 \\ K_2 \end{matrix}} \right\} \text{при } U_{\text{в}} = 0,3U_{\text{ном}}$ $K_2 = 0,6 \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} K_1 \\ K_2 \end{matrix}} \right\}$ $K_1 = 3 \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} K_1 \\ K_2 \end{matrix}} \right\} \text{при } U_{\text{в}} = 0,04U_{\text{ном}}$ $K_2 = 0,84$	См. табл. 7
	Время выдержки срабатывания реле $t_{\text{с.р}}$	$t_{\text{с.р}} = \frac{R_{KL} RC}{R_{KL} + R} \times$ $\times \left[\ln \left(1 - \frac{R_{KL} + R}{R_{KL}} \frac{U_{\text{с.р}}}{U} \right) \right]$	$t_{\text{с.р}} = 0,6RC$ при $R_{KL} = R$ и $U_{\text{с.р}} = 0,35U_{\text{ном}}$	—

ровано заданное (два — четыре) количество циклов асинхронного хода. С этой целью она использует II ступень устройства и узел дополнительной выдержки времени. При действии III ступени вырабатывается сигнал «Длительный АР» (рис. 17,а), обеспечивающий отключение электропередачи с запретом трехфазного АПВ (ТАПВ).

Описание схемы устройства с тремя ступенями. Принципиальная схема трехступенчатого основного устройства АЛАР приведена на рис. 17,а и б, поясняющие диаграммы работы устройства — на рис. 17,в.

Установка перемычек в рядах зажимов панели определяется структурой действия устройства. Возможные варианты их использования приведены в табл. 2.

Поскольку в рассматриваемом устройстве АЛАР возможны различные варианты использования реле сопротивления, группам контактов комплекта *AKZ1* (КРС-2), образующим те или иные пусковые органы сопротивления, даны условные обозначения в соответствии с их функциональным назначением:

орган сопротивления, контролирующий скорое и изменения сопротивления на зажимах реле в первом цикле, — $ОС_{п.ц}$;

орган сопротивления, являющийся пусковым органом счетчика циклов, — $ОС_{п.ц}$;

орган сопротивления, фиксирующий ЭЦК, — $ОС_{эцк}$.

В зависимости от конкретных условий предусматриваются различные варианты использования реле сопротивления, формирующих указанные органы ОС (табл. 3).

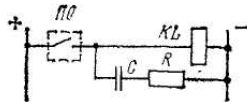
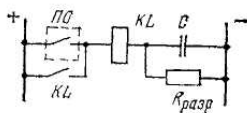
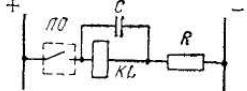
Для повышения надежности выполнения возлагаемых на ОС функций предусмотрена в зависимости от варианта использования перегруппировка контактов реле сопротивления *KZ1*, *KZ2* и *KZ3*, формирующих группы ОС. Она осуществляется на цоколе комплекта в соответствии с принимаемым вариантом исполнения устройства. Реле сопротивления, выполняющие функции ОС, в соответствии с обозначениями реле и вариантами их использования приведены в табл. 4.

Фиксация АР по скорости изменения сопротивления. При АР годограф сопротивления на зажимах реле сопротивления (Z_p , рис. 17,0) последовательно входит сначала в область срабатывания чувствительного реле сопротивления KZ_c и затем грубого реле сопротивления KZ_U . При срабатывании KZ_c пускается

Таблица 4. Использование реле сопротивления ОС

ОС	Реле (варианты по табл. 3)
$ОС_{эцк}$	<i>KZ2</i> , <i>KZ3</i> (3а, 3б, 4б); <i>KZ3</i> (4а)
$ОС_{с, ц}$	<i>KZ1</i> (все варианты); <i>KZ2</i> , <i>KZ3</i> (1а, 1б); <i>KZ3</i> (2а, 2б)
$ОС_{п, ц}$	<i>KZ1</i> , <i>KZ3</i> (2а); <i>KZ1</i> (2б, 4а, 4б) — чувствительные реле; <i>KZ2</i> (2а, 2б, 4а, 4б) — грубое реле

Таблица 5 Расчетные формулы и схемы времязадающих цепочек

Расчетная схема	Условие выбора	Расчетные формулы	Упрощенные расчетные формулы	Примечания
	Время возврата реле t_b	$t_b = (R + R_{KL}) C \times \ln \left[\frac{R_{KL}}{R_{KL} + R} \times \frac{U (1 - e^{-t_n/(RC)})}{U_b} \right]$	$t_b = K (R + R_{KL}) C,$ где $K = 1$ при $U_b = 0,3U_{ном}$, $K = 3$ при $U_b = 0,04U_{ном}$	См. табл. 6
	Время возврата реле t_n после срабатывания; время готовности к повторному срабатыванию t_r	—	$t_n = K_1 R_{KL} C, \quad t_r = K_2 R_{разр} C,$ где $\left. \begin{array}{l} K_1 = 1 \\ K_2 = 0,6 \end{array} \right\} \text{при } U_b = 0,3U_{ном}$ $\left. \begin{array}{l} K_1 = 3 \\ K_2 = 0,84 \end{array} \right\} \text{при } U_b = 0,04U_{ном}$	См. табл. 7
	Время выдержки срабатывания реле $t_{c,p}$	$t_{c,p} = \frac{R_{KL} RC}{R_{KL} + R} \times \ln \left(1 - \frac{R_{KL} + R}{R_{KL}} \frac{U_{c,p}}{U} \right)$	$t_{c,p} = 0,6RC \text{ при } R_{KL} = R \text{ и } U_{c,p} = 0,35U_{ном}$	—

реле времени $KT1$ и через заданное время $t_{кт1} \geq 0,20$ с срабатывает. После срабатывания KZ_r реле $KT1$ удерживается через свой контакт $KT1.2$. Срабатывание реле $KL8$, фиксирующего 0,5 цикла асинхронного хода, собирает цепь на выходное реле $KL1$ (или $KL2$). Последнее срабатывает на некоторое время и затем возвращается. В зависимости от знака скольжения (реле $KL4$ или $KL6$) реализуется соответствующее противоаварийное мероприятие. Если фиксация знака скольжения не нужна, то переставляется перемычка в цепи катушки $KL1$ (или в цепи катушки $KL2$). Блокировка при близком несимметричном КЗ осуществляется с помощью фильтрового реле напряжения обратной последовательности $AKB1$: при его срабатывании размыкается цепь выходного реле I ступени $KL1$ и $KL2$.

Если время между последовательным срабатыванием KZ_q и KZ_r менее расчетного (признак КЗ), то $KT1$ не успеет работать.

Длительность выходного сигнала I ступени $t_n > 0,2$ с, ее действие однократно, повторная готовность к действию наступает через 1—2 мин. Указанные характеристики обеспечиваются RC-контуром ($C1$, $C2$) и наличием цепи самоудерживания выходного реле $KL1$ или $KL2$.

Расчетные формулы, схемы времязадающих цепочек и их расчет для устройства в целом приведены в табл. 5, 6 и 7, где ПО — контакты пускового органа; R_{KL} — активное сопротивление катушки реле; $R_{разр}$, R , C — сопротивление и емкость RC-контуров; U_b , $U_{c,p}$ — напряжение возврата и срабатывания реле соответственно; U — расчетное напряжение питания; $U_{ном}$ — номинальное напряже-

Таблица 6. Выбор конденсаторов для RC-контуров реле *KL8*, *KL10*, *KL12*, *KL14*, *KL24* (рис. 17,б) и реле *KL2*, *KL3* (рис. 26,а)

C, мкФ	R, Ом	t_B , с	
		$U_B = 0,04 U_{НОМ}$	$U_B = 0,3 U_{НОМ}$
2	} 2700	0,07—0,18	0,02—0,03
4		0,13—0,15	0,03—0,05
6		0,19—0,23	0,04—0,08

Таблица 7. Выбор конденсаторов для RC-контуров реле *KL1*, *KL20* * (рис. 17,б)

C, мкФ	$R_{разр}$, Ом	t_H , с		t_T , с
		$U_B = 0,04 U_{НОМ}$	$U_B = 0,3 U_{НОМ}$	
2	10^3	0,06	0,02	0,001
6	10^3	0,17	0,06	0,004
20	$5,6 \cdot 10^3$	0,58	0,19	84
30	$5,6 \cdot 10^3$	0,79	0,26	124

* $R_{разр} = R_T$.

жение питания; t_u —время замкнутого состояния ПО (ЛХ); t_B , $t_{с,р}$ — время возврата и срабатывания реле соответственно; t_T — время готовности реле к повторному действию. При этом в табл. 6 принято $t_{мин} \approx 0,025$ с (для скольжения 10 Гц) и $t_{umax} \approx 3RC$ при $U=176 \div 242$ В, а в табл. 7 значение t_u определяется при $U=176$ В, t_T —при $U=242$ В и $U_{с,р}=0,5U_{НОМ}$.

Фиксация циклов асинхронного хода (II и III ступеней). Пусковые цепи этой части устройства включают в себя ОС_{с,ц}, реле активной или реактивной мощности *KW1*, настраиваемое путем изменения его угла максимальной чувствительности и мощности срабатывания, и промежуточные реле *KL3—KL7*. Пусковые цепи осуществляют фиксацию срабатывания или возврата *KW1* при замкнутом контакте *ОС_{сл}* и фиксацию окончания цикла асинхронного хода по возврату *ОС_{с,ц}*. Действие пусковых цепей фиксируется промежуточными реле *KL8—KL16*. Промежуточным реле *KL19* фиксируется срабатывание *ОС_{эцк}*, означающее, что ЭЦК находится в контролируемом сечении.

Последовательность работы элементов схемы показана на рис. 17,в. Работа схемы (например, при ускорении генераторов станции; расположенной за «спиной» устройства, чему соответствует опережение вектором *E1* вектора *E2*) происходит следующим образом.

В предшествующем (исходном) режиме замкнут контакт *KW1.1*. При возникновении АР, сопровождающегося увеличением угла между ЭДС передающего и приемного концов электропередачи и снижением сопротивления на зажимах реле сопротивления, срабатывает *ОС_{с,ц}* и затем реле *KL3*, *KL4*, которые самоудерживаются через контакт *KL3.1*. При увеличении угла β сверх 180° направление контролируемой мощности изменяется на обратное, размыкается контакт *KW1.1* и замыкается *KW1.2*, вызывая срабатывание реле *KL7* и *KL8* (фиксация 0,5 цикла).

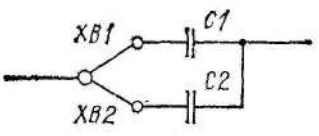
При дальнейшем увеличении угла β и приближении его к 360° реле

сопротивления OC_{CII} возвращается; возвращаются реле $KL3$, $KL4$, $KL7$. Замыкание контактов $KL7.2$ и $KL3.4$ приводит к срабатыванию органа фиксации 1-го цикла — реле $KL9$, которое самоудерживается и рвет цепь катушки реле $KL8$, исключая его работу в последующих циклах асинхронного хода.

Реле $KL8$ (а также реле KLW , $KL12$, $KL14$, фиксирующие полуциклы) с помощью RC-цепочки выполнено с выдержкой времени на возврат (0,04—0,08 с), обеспечивающей прохождение импульса на срабатывание и самоудерживание реле фиксации цикла $KL9$ ($KL11$, $KL13$, $KL15$). В табл. 8 приведены варианты включения и параметры конденсаторов RC-цепочек устройства в целом.

При последующих циклах асинхронного хода действие всех указанных реле происходит аналогичным образом. При этом в конце 2-го цикла срабатывает и самоудерживается реле $KL1$, в конце 3-го цикла — $KL3$, в конце 4-го цикла — $KL15$. При необходимости фиксировать ЭЦК цепь срабатывания $KL15$ собирается через замыкающий контакт $KL19.4$.

Таблица 8. Варианты включения конденсаторов $C1—C6$, $C8$

Схема включения	Используется конденсатор	Установлены переключки	Включенная емкость, мкФ	
			$C1$	$C2—C6$, $C8$
	$C1$	$XB1$	10	2
	$C2$	$XB2$	20	4
	$C1, C2$	$XB1, XB2$	30	6

После фиксации трех циклов контактом $KL13.1$ подготавливается цепь на срабатывание реле фиксации ЭЦК $KL19$, которое при срабатывании $OC_{ЭЦК}$ срабатывает и самоудерживается в 4-м цикле асинхронного хода. Одновременно, после фиксации 3-го цикла, подготавливается цепь фиксации знака скольжения: срабатывание реле $KL4$ в начале 4-го цикла приводит к срабатыванию и самоудерживанию реле фиксации ускорения генераторов $KL17$.

Срабатывание $KL5$, $KL17$ и $KL19$ обуславливает замыкание выходной цепи «АР с ускорением, II ступень» (контакты $KL15.3$, $KL17.2$, $KL19.2$ на рис. 17,а) и выполнение соответствующего противоаварийного мероприятия. Одновременно контактом $KL15.2$ осуществляется пуск узла дополнительной выдержки времени ($KT3$, $KT4$, $KL22$).

Работа схемы при торможении генераторов станции, расположенной за «спиной» устройства (этому соответствует отставание вектора E_1 от вектора E_2 на рис. 17,в), происходит аналогичным образом, но поскольку сначала замкнут контакт $KW1.2$, срабатывают соответственно реле $KL5$, $KL6$ и $KL18$ вместо $KL3$, $KL4$ и $KL17$. Срабатывание $KL5$, $KL18$ и $KL19$ обуславливает замыкание выходной цепи «АР с торможением, II ступень» (контакты $KL15.4$, $KL18.2$, $KL19.3$ на рис. 17,а) и выполнение соответствующего противоаварийного мероприятия. В случае необходимости знак скольжения и $OC_{ЭЦК}$ можно не

фиксировать (шунтируются соответствующие контакты). После срабатывания реле *KL15* происходит срабатывание реле возврата устройства *KL22*, имеющего время срабатывания примерно 0,25 с, что обеспечивает надежное прохождение выходного импульса; выдержка времени реле на возврат *KL22* также составляет примерно 0,25 с, что обеспечивает надежный возврат устройства.

Таким образом, пусковые цепи и счетчик циклов остаются обесточенными на все время, пока катушка реле *KL22* обтекается током, т. е. на время до замыкания проскальзывающего контакта *KT4.2* и срабатывания реле *KL23*. Контакт *KL23.3* через контакт *KT3.1* размыкается цепь удерживания реле *KL22*, которое, возвращаясь, замыкает свои контакты в пусковых цепях и счетчике циклов, чем приводит схему в состояние готовности к повторному счету циклов асинхронного хода и производит переключение в цепях катушек реле *KL15* и *KL16*. Если к этому времени АР не прекратился, устройство вновь фиксирует его в течение времени после срабатывания контакта *KT4.2* до момента срабатывания контакта *KT4.3*. Через заданное количество циклов срабатывает выходное реле *KL16*, выполняя с контролем ЭЦК через цепь контакта *KL19.4* или без него III ступень противоаварийных мероприятий (отключение электропередачи).

Возврат устройства осуществляется аналогично предыдущему случаю, с помощью реле *KL22*, срабатывающего от контакта *KL16.2*, возврат узла дополнительной выдержки времени произойдет после доработки реле *KT4*, шунтирующего своим основным с выдержкой времени контактом *KT4.3* катушку реле *KT3*.

При возникновении несимметричного *K3*, обуславливающего появление напряжения обратной последовательности, срабатывает фильтр-реле *AKB1* и своим замыкающим контактом *AKB 1.2* подает «+» на катушку реле *KL22*, блокируя тем самым устройство на время существования напряжения обратной последовательности. Для обеспечения чувствительности уставка *AKB1* выбирается, как правило, минимальной по условию отстройки от напряжения небаланса.

Схема устройства позволяет контролировать длительность каждого из циклов асинхронного хода, блокируя действие устройства, если цикл имеет период больше заданного. Контроль длительности цикла асинхронного хода, а также возврат устройства после случайной фиксации цикла выполняются с помощью реле времени *KT2*, включающего своим основным с выдержкой времени контактом *KT2.2* реле *KL22*.

Работа узла контроля периода асинхронного хода происходит следующим образом. При фиксации 0,5 цикла по цепи контакта *KL8.2* срабатывает реле *KT2*, удерживаясь через свой мгновенный контакт *KT2.1*; срабатывание реле *KL20* (фиксация 1,5 цикла) приводит к срабатыванию реле *KL20* и возврату *KT2*; необходимая выдержка времени на возврат *KL20* определяется временем, достаточным для возврата *KT2* (~0,1 с). После возврата реле *KL20* по цепи контакта *KL20.1* снова создается цепь на срабатывание *KT2* через контакт *KL10.2*.

Аналогичным образом происходит контроль длительности цикла асинхронного хода между моментами фиксации 1,5 и 2,5 цикла, 2,5 и 3,5 цикла. Этот узел выполняет также функцию возврата устройства в том случае, если отсчитано 3,5 цикла, а фиксации 4-го цикла не произошло.

При большом скольжении (ориентировочно 3—5 Гц) и времени возврата реле *KL20* примерно 0,1 с узел контроля периода асинхронного хода может отказать, однако это не означает снижения работоспособности устройства в целом, так как не приводит к его возврату, а лишь исключает излишнюю работу *KT2*. Для ускорения готовности реле *KL20* к повторному срабатыванию после его возврата предусмотрен быстрый разряд конденсатора *C6*.

С помощью перемычек, устанавливаемых на панели, возможна фиксация АР через 2, 3 или 4 цикла асинхронного хода с дополнительной выдержкой времени и без нее, с учетом знака скольжения и без него, с фиксацией ЭЦК и без него. Знак скольжения к ЭЦК фиксируются за цикл до срабатывания устройства.

Для контроля за общим количеством пусков устройства предусмотрен электромагнитный счетчик импульсов *BC1*.

Для фиксации длительного срабатывания чувствительного реле *KZ_c* и пускового органа счетчика циклов *ОСс,ц*, фиксации неисправности цепи контроля периода асинхронного хода (реле *KL20*), а также фиксации длительной блокировки устройства (реле *KL22*) предусмотрено реле времени *KT5* с выходом на указательное реле *КН*, установленное в комплекте *AKZ1*. Выдержка времени на реле *KT5* должна быть больше суммарного времени замыкания контактов *KT3.2* и *KT4.3*, если используется ресинхронизация, и может быть меньше, если она не используется.

Действие устройства сигнализируется указательными реле *КН1—КН5*, для проверки действия устройства предусмотрено сигнальное сопротивление *R14* (рис. 17,а).

Пуск осциллографа осуществляет реле *KL21*, срабатывающее от реле *KL7*; последнее фиксирует переориентацию реле мощности. С учетом периодического характера срабатывания *KL7* выполнено самоудерживание реле *KL21*, обеспечивающего работу осциллографа до момента снятия оперативного тока со счетчика циклов. Для анализа работы устройства предусмотрено осциллографирование срабатывания контактов реле *KL4* и *KL6*, характеризующих знак скольжения, и реле *KL7*, характеризующего отсчет полуциклов. Это осциллографирование может быть осуществлено с помощью одного шлейфа, для чего в цепи указанных контактов включены резисторы с разными сопротивлениями.

Для исключения одновременного действия двух или более устройств АЛАР, установленных на смежных ВЛ и выполняющих разные управляющие воздействия при АР, могут быть использованы: различные уставки по циклам, различные уставки во времени, взаимное электрическое блокирование.

Для электрического блокирования одним устройством другого в каждом из них предусмотрено реле *KL24*, включение которого осуществляется согласно рис. 18,а и б. Длительность блокирования при срабатывании I ступени составляет (с учетом данных табл. 5—7) 0,5—3,5 с. На это время выводятся из работы I ступень и счетчик циклов блокируемого устройства. После деблокирования второго комплекта его счетчик циклов начинает новый счет циклов и вводится его I ступень. Длительность блокирования при срабатывании II ступени составляет 0,2—2,9 с. На это время выводятся из работы II, III ступени и счетчик циклов второго устройства,

который после деблокирования вновь вводится в действие.

Для обеспечения преимущества одного устройства перед другим в случае их одновременного срабатывания (для исключения срыва выходного импульса) возможно задание преимущества (по циклам) одному устройству перед другим или использование цепи *C8*, *R13*, подключаемой параллельно к обмотке реле *KL24* того комплекта АЛАР, действие которого при этом предпочтительнее.

Варианты структуры выполнения взаимного блокирования основных устройств АЛАР при одном типе управляющих воздействий приведены на рис. 18,в. При использовании двух типов управляющих воздействий, т. е. при использовании ресинхронизации, взаимно блокируемые устройства АЛАР могут выполнять два — четыре различающихся управляющих воздействия. Учет знака скольжения обуславливает в общем случае возможность согласования действия смежных устройств АЛАР без взаимного блокирования. На рис. 18,г приведена основная структура согласования смежных устройств АЛАР при двух типах управляющих воздействий.

При проведении наладочных работ по вводу основного трехступенчатого устройства АЛАР на Рязанской ГРЭС было обнаружено, что при размыкании контактов реле сопротивления в цепях I ступени после ее срабатывания на отключение наблюдается многократное (вплоть до момента размыкания контакта *KL8 3*) срабатывание выходного реле *KL1 (KL2)* этой ступени (см рис 17.б). Это происходит из-за разряда емкости *C1* в цепи катушек реле *KT1* и *KL1 (KL2)* через диод *VD1.1* при снятии с нее плюса оперативного тока, приводящего к повторному срабатыванию реле *KL1 (KL2)*, и из-за возникновения ЭДС самоиндукции в обмотке катушки *KT1*, обуславливающей протекание тока, согласного с током разряда *C1*

В комплект реле *KT1* входит варистор, шунтирующий его катушку, и поэтому значение ЭДС самоиндукции ограничено. Однако в случае неисправности цепи варистора возникает вероятность срабатывания реле *KL1 (KL2)* из-за возникновения ЭДС самоиндукции в указанной цепи при внешнем АР, сопровождающемся срабатыванием чувствительного реле сопротивления *KZ_ч*, переориентацией реле мощности (срабатыванием реле *KL8*) и последующим возвратом *KZ_ч*.

Для исключения многократного повторного срабатывания выходных реле I ступени основного устройства АЛАР после первого срабатывания, а также для исключения возможности их излишнего срабатывания при внешнем АР в случае неисправности защитной цепочки, шунтирующей катушку реле времени *KT1*, достаточно включить в рассечку между зажимами *16-18* или *30-31* диодный мостик (В случае необходимости контроля обоих знаков скольжения дополнительно соединяются зажимы *31* и *18*). Диоды должны быть рассчитаны на 300—400 В обратного напряжения и ток 0,3 А и должны шунтироваться резисторами с сопротивлением 100 кОм типа МЛТ-0,5

Однако первая из отмеченных особенностей I ступени устройства проявляется только после ее срабатывания, т. е. редко, и не приводит к неправильному функционированию устройства; проявление второй особенности маловероятно, а дополнительная диодная развязка приводит к снижению надежности. С учетом изложенного необходимость установки диодной развязки для устранения

отмененных особенностей I ступени не очевидна

Наблюдался случай излишнего срабатывания счетчика циклов основного устройства АЛАР, заключающийся в том, что при исчезновении переменного напряжения, питающего измерительные цепи устройства, и последующем восстановлении напряжения устройство сработало как при фиксации одного цикла асинхронного хода и длительно его запомнило. Этому соответствовали следующие

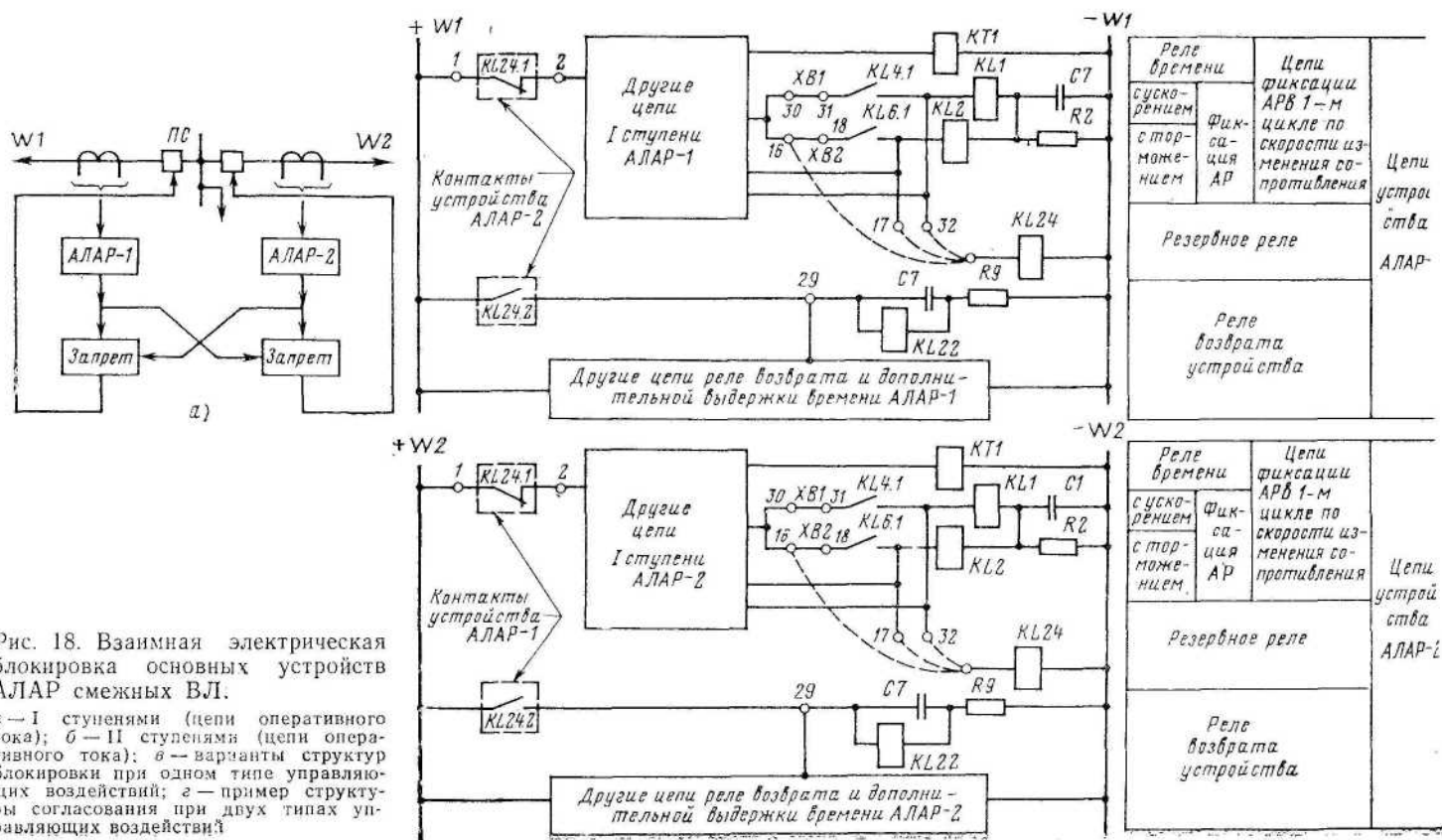
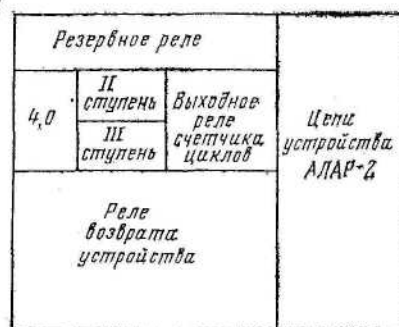
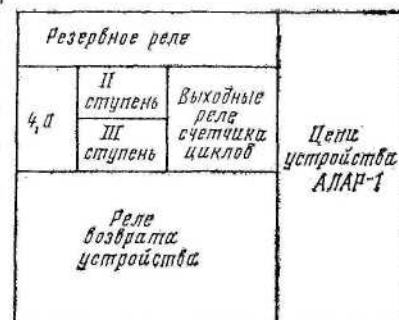
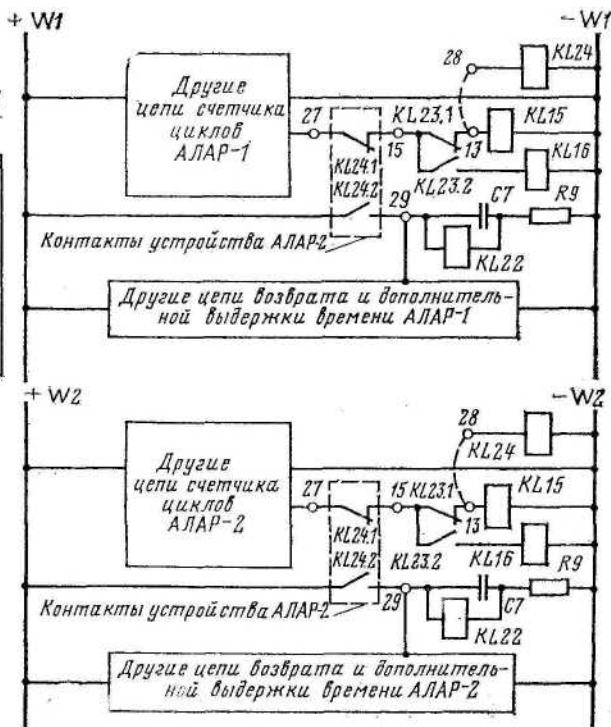
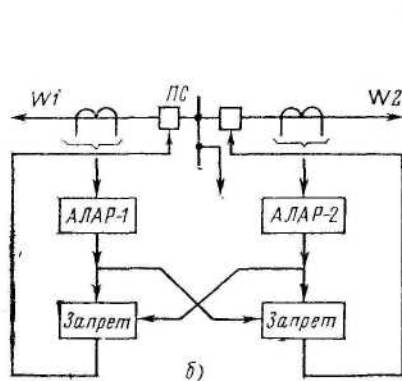


Рис. 18. Взаимная электрическая блокировка основных устройств АЛАР смежных ВЛ.

а — I ступенями (цепи оперативного тока); б — II ступенями (цепи оперативного тока); в — варианты структур блокировки при одном типе управляющих воздействий; г — пример структуры согласования при двух типах управляющих воздействий.



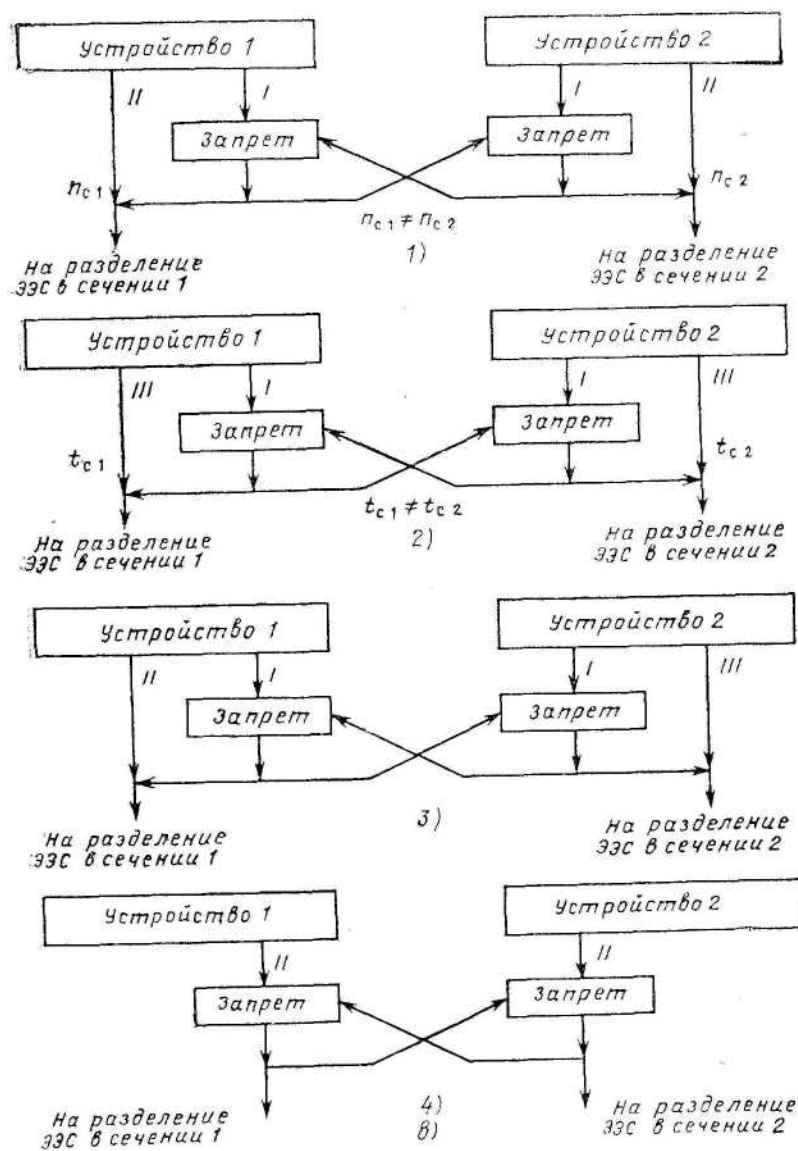


Рис. 18. Продолжение

щие условия: при потоке мощности от шин в линию отключение трехфазного автоматического выключателя трансформатора напряжения, через который питаются измерительные цепи устройства, привело к размыканию контакта $K.W1.1$ и замыканию контакта $KW1.2$, срабатыванию органа сопротивления счетчика циклов ОСс,ц, реле $KL5$, $KL6$ и запуску реле времени $KT5$, фиксирующего неисправность устройства. После включения автоматического выключателя, до возврата ОСс,ц, успело сработать реле $KW1$ (замкнулся контакт $KW1.1$), что при-

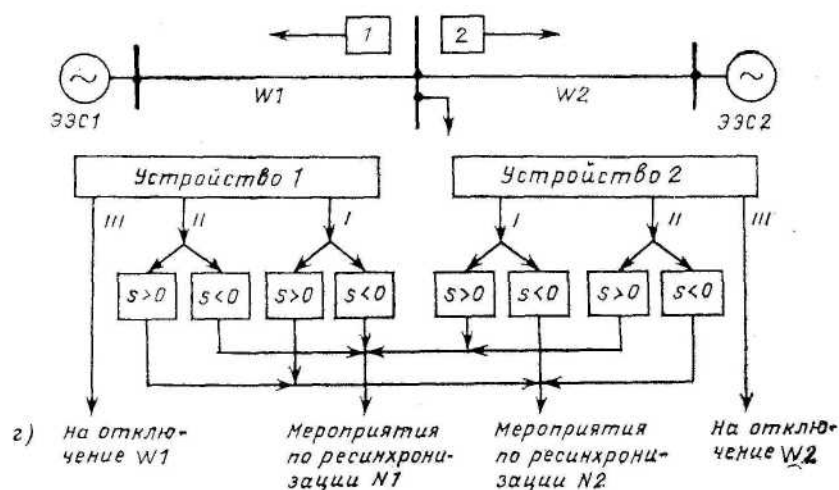


Рис. 18. Продолжение

вело к кратковременному срабатыванию $KL7$, так как вслед за этим произошел возврат ОСс,ц. Однако этого времени хватило на то, чтобы каскадно сработало $KL8$ и замкнуло свой контакт $K.L8.1$ в цепи реле $K.L9$. Последовавший в этот момент возврат $KL7$ и $KL5$ привел к срабатыванию реле $KL9$. Ввиду кратковременности срабатывания реле $KL8$ (вследствие чего оказалась мала его выдержка времени на возврат) реле времени $K.T2$ не успело встать на самоудерживание (контакт $KT2.1$ не замкнулся), что привело к отказу цепи контроля периода асинхронного хода и цепи деблокировки устройства (через реле $KL22$). Такая ситуация — ложная фиксация цикла — может привести в итоге к ложному срабатыванию устройства при нескольких попытках включить автоматический выключатель трансформатора напряжения, следующих подряд одна за другой с интервалом, меньшим времени срабатывания реле $KT5$, подающего сигнал о неисправности устройства.

С целью исключения вероятности ложной фиксации цикла асинхронного хода счетчиком основного устройства АЛАР при подаче переменного напряжения на вход устройства (включении автоматического выключателя в цепях трансформатора напряжения) должны быть обеспечены наибольшее время возврата реле- $KL8$ (путем включения максимальной емкости конденсатора $C2$) и минимальное время срабатывания реле $KT2$.

Если при наладке (проверке) будет выявлена неэффективность этих мероприятий и возможность ложного функционирования счетчика циклов, то рекомендуется предусмотреть блокирование устройства АЛАР от устройства блокировки при неисправности цепей напряжения типа КРБ-12, воздействующего своим замыкающим контактом (или его повторителем) на срабатывание реле- $KL22$, или сигнализацию длительного состояния срабатывания реле $KL9$ (от его контакта $KL9.1$ через дополнительный диод $VD4$ на вход реле $KT5$).

Возможно и другое решение (ЭСП, ЦДУ ЕЭС СССР), заключающееся в том, что размыкающие контакты реле $KL9$, $KL11$, $K.L13$ включаются

последовательно в цепь промежуточного реле (*KL24* или дополнительно устанавливаемого); его.

размыкающий контакт должен быть подключен к сборке контактов в цепи пуска реле времени *KT2*, контролирующего период *AP*, параллельно его замыкающему контакту *KT2.1* Тогда при ложном срабатывании любого реле (*KL9, KL11, KL13*) отпадает якорь реле *KL24* и запускается реле времени *Л/2*, которое своим контактом *KT2.2* замыкает цепь реле *KL22* Последнее срабатывает и приводит к возврату всей схемы устройства АЛАР в исходное состояние При реализации такого решения цепь диода *V Д2.2* может быть исключена.

В одном из энергообъединений было зафиксировано ложное срабатывание I ступени основного устройства АЛАР при КЗ сопровождающемся срабатыванием входящего в устройство блокирующего реле *AKB1* Причина — перекос мостикового контакта реле *AKB1* в момент его срабатывания, приведший к кратковременному переключению расположенных наискось неподвижных контактов, выведенных к зажимам 1 и 7 реле к которым подключены соответственно плюс оперативного тока и выходные реле I ступени устройства В нормальном режиме замкнуты контакты соответствующие зажимам 5 и 7 реле, а при срабатывании — контакты соответствующие зажимам 1 и 3 реле

С целью исключения при КЗ излишнего срабатывания I ступени основного устройства АЛАР из за дефекта контактной группы реле *AKB1* рекомендуется поменять местами концы подведенных к зажимам 5 и 7 реле внешних монтажных проводов (см рис 17, б) исключив существующую возможность попадания плюса оперативного тока с зажима 1 на вход цепи выходных реле I ступени

Возвращаясь к блокировке I ступени по напряжению обратной последовательности U_2 , заметим, что она может и не предотвратить излишнее срабатывание ступени и при качаниях, сопровождающихся несимметричным КЗ если реле *KT1* успеет сработать до КЗ При возникновении в этих условиях КЗ, сопровождающегося переориентацией реле мощности *KW1*, реле *KL8* сработает раньше реле блокировки *AKB1*, сработает выходное реле *KL1* или *KL2* и останется в сработанном положении по цепи самоудерживания. При глубоких качаниях, сопровождающихся переориентацией *KW1*, и последующем КЗ это становится весьма вероятным Включение контакта *AKB1.1* в цепь катушек реле *KL1* и *KL2* со стороны минуса оперативного тока могло бы понизить вероятности такого излишнего действия I ступени.

Если время срабатывания *AKB1 TCAKB1* окажется больше t_{KT1} , то при несимметричных КЗ блокировка по U_2 не влияет на функционирование I ступени, так как последняя будет заблокирована благодаря отстройке времени срабатывания реле *K.T1* от времени разновременности срабатывания $t_{разн}$ реле *KZ_ч* и *KZ_р* при КЗ $t_{KT1} > t_{разн}$) Если же t_{CAKT1} окажется меньше t_{KT1} , то *AKB1* успеет заблокировать I ступень раньше. В этом случае функции блокировки по скорости изменения сопротивления при несимметричных КЗ (но не трехфазных!) могли бы быть поручены с большей эффективностью

блокировке по U_2 . Необходимость блокирования при трехфазном КЗ делает, однако, необходимой блокировку по скорости, и поэтому она не может быть заменена на блокировку по U_2 даже в случае $t_{CAKB1} < t_{KTI}$. Однако такое быстрое действие блокировки по U_2 может привести к неселективной блокировке I ступени в условиях АР (или трехфазном КЗ) по контролируемой связи, имеющей несимметрию фаз (из-за неполного транспонирования проводов ВЛ), наиболее остро проявляющуюся в зоне углов $\delta_{\Sigma} = 180^\circ$ и тем сильнее, чем ближе место установки устройства к ЭЦК. Для исключения вероятности такого неселективного действия должно быть выполнено условие $t_{CAKB1} > t_{KTI} > t_{\text{разн.}}$.

Возможно и другое решение — повышение напряжения срабатывания $AKB1$ по U_2 до значения, исключающего его срабатывание при АР по ВЛ из-за ее несимметрии в полнофазном режиме. Получающееся при этом заглубление реле повышает вероятность срабатывания I ступени при качаниях, сопровождающихся удаленным несимметричным КЗ. Для оптимизации выбора t_{KTI} и t_{CAKB1} должны быть проведены соответствующие сопоставительные расчеты их значений в каждом конкретном случае.

Расчет параметров срабатывания. Расчету подлежат характеристики срабатывания реле сопротивления, используемые в ОСэцк, ОС_{с,ц} и ОС_{п,ц}, реле мощности $KW1$, реле времени контроля длительности периода асинхронного хода, реле времени, осуществляющих дополнительную выдержку времени при использовании ресинхронизации.

При этом согласование характеристик срабатывания ОС_{с,ц} и $K.W1$ осуществляется путем ориентации характеристики срабатывания $KW1$ относительно характеристики срабатывания ОС_{с,ц}.

Использование или неиспользование I ступени определяет условие выбора угла максимальной чувствительности реле, входящих в ОС_{с,ц}, в том случае, когда они выполняют функцию KZ_α в ОС_{п,ц}. При неиспользовании I ступени указанный угол определяется условием оптимальной настройки ОС_{сл} с точки зрения фиксации АР в расчетных схемах, а при использовании I ступени — условием обеспечения срабатывания I ступени при угле β , близком к $\beta_{кр}$.

С учетом изложенного порядок расчета параметров срабатывания основного устройства предусматривает:

- 1) определение исходных данных (параметры схем замещения и пр.);
- 2) построение характеристик Z_p и S_p для рассматриваемых схем, где Z_p — годограф сопротивления на зажимах реле, S_p — годограф мощности на зажимах реле;
- 3) построение характеристик срабатывания реле сопротивления, отстроенных от Z_p в заданных схемах и режимах;
- 4) построение характеристики срабатывания реле мощности;
- Б) проверку коэффициента чувствительности реле сопротивления;
- б) определение скольжения отказа $S_{отк}$ при котором данная ступень устройства начинает отказывать, и сравнение его с ожидаемым скольжением $S_{ож}$
- 7) определение временных характеристик устройства.

Исходные данные в части Z_p и S_p могут быть получены в основном либо путем моделирования расчетных схем и динамических на электронных моделях или ЭВМ, либо путем расчёта (на ЭВМ) режимных параметров в цикле асинхронного хода применительно к ряду наперед заданных значений угла δ . По первому способу значения ЭДС определяются расчетом предаварийного режима. По второму способу расчеты ведутся без учета электромеханического процесса, например, по программе токов КЗ. Поэтому задаются граничные значения ЭДС. Принимается, что отношение ЭДС наименее благоприятно в данных конкретных условиях и составляет $R=1,1/0,9$, или $R=0,9/1,1$.

Ниже приведен рекомендуемый метод получения исходных годографов Z_p и S_p по второму способу. Используемые в тексте расчетные выражения приведены для первичных значений режимных параметров.

1. Намечаются расчетные схемы работы ЭЭС, обуславливающие наибольшее и наименьшее удаление ЭЦК от места установки устройства, а также наибольшее скольжение при асинхронном ходе по контролируемому сечению и наименьшее удаление ЭЦК при внешнем асинхронном ходе. Результатами расчетов являются годографы Z_p и S_p с нанесенными на них углами δ .

2. Для каждого из годографов Z_p определяется угол $\varphi_{\min}$, при котором величина $|Z_p|$ минимальна ($Z_{p\min}$). Этот угол определяется графически как угол между осью R и проходящей через начало координат нормалью к годографу Z_p (перпендикулярной касательной в точке ее касания годографа).

3. Из числа схем сети, в которых рассматривается асинхронный ход по контролируемому сечению, выбираются две схемы с крайними годографами Z_p — наиболее высоким и наиболее низким по линии максимальной чувствительности. Если годографы Z_p в рассматриваемых схемах имеют существенно разные значения $Z_{p\min}$, то в качестве расчетных должны рассматриваться каждая из них.

4. Исходные данные, предусматриваемые для расчета периода допустимого скольжения $T_{\text{доп}}$, должны быть определены расчетным путем. Период допустимого скольжения определяется [см. (3) и § 1] по формуле

$$T_{\text{доп}} \approx \frac{1}{50} \sqrt{\frac{314 T_{\text{эк}} P_0}{P_{\text{пр}}}}. \quad (37)$$

Расчет ОС_{ЭЦК}. Определяется среднее значение угла $\varphi_{\min}^{\text{ср}}$ для годографов Z_p , рассчитанных для асинхронного хода по контролируемому сечению:

$$\varphi_{p\min}^{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n \beta_i \varphi_{p\min,i}}{\sum_1^n \beta_i}, \quad (38)$$

где $\varphi_{\min,i}$ — угол $\varphi_{\min}$ для i -й схемы; β_i — коэффициент веса i -й схемы, характеризующий ее значимость и вероятность.

На практике, как Правило, ограничиваются расчетами в двух режимах при $\beta=1$. В качестве угла максимальной чувствительности реле $\varphi_{\text{м.ч}}$ выбирается один из двух заводских (80 или 65°), ближайший к полученному среднему

значению.

Строятся годографы Z_p для внешнего асинхронного хода. Вектор каждой точки годографов уменьшается на $0,25Z_p$. Так учитывается запас, обусловленный погрешностями расчета. Полученные характеристики являются опорными при выборе ОСэцк.

С центром на линии, проходящей через начало координат под углом $\varphi_{м,ч}$ проводится окружность, касающаяся по возможности большего числа этих характеристик. Определяются значения сопротивлений срабатывания ОСэцк в I и III квадрантах соответственно $Z_{с,р}^I$ и $Z_{с,р}^{II}$. Проверяется, что значение $Z_{с,р}^{II}$ меньше максимально

возможного смещения характеристики реле в III квадрант

$$C \approx Z_{с,р}^{II}/Z_y \leq 0,2, \quad (39)$$

где C — уставка смещения; $Z_y \approx Z_{с,р}^I - Z_{с,р}^{II}$ — уставка на реле (принято, что приращение характеристики срабатывания в III квадранте примерно равно ее приращению в I квадранте).

Характеристика выполняется со смещением, равным одному из трех ($C=0,06; 0,12; 0,20$), ближайшему к рассчитанному по (39), либо с центром в начале координат ($C=0,5$).

После этого проверяется отстройка от максимального рабочего режима.

При этом

должно

$$Z_{с,р} \leq \frac{k_n Z_{min \text{ раб}}}{2} \left(\sqrt{\frac{\cos^2 \gamma}{C^2} + \frac{4(1+C)}{C}} - \frac{\cos \gamma}{C} \right),$$

$$Z_{с,р} \leq \frac{k_n Z_{min \text{ раб}}}{\cos \gamma} \text{ при } C = 0, \quad (40)$$

обеспечиваться

где $Z_{min \text{ раб}} = U_{min \text{ раб}} / (\sqrt{3} I_{max \text{ раб}})$ — сопротивление на зажимах реле в максимальном длительном рабочем режиме; $\gamma = \varphi_{м,ч} - \varphi_{раб}$; $\varphi_{раб}$ — аргумент вектора $Z_{min \text{ раб}}$; $\varphi_{м,ч}$ — принятый угол максимальной чувствительности реле; $R_n = 0,8$ — коэффициент надежности отстройки.

Если определяющим является рабочий режим, то ОСэцк может быть исключен из устройства, т. е. его функции будут выполняться ОС_{0,ц}.

4. Если значение $Z_{с,р}^{II}$ больше смещения $C=0,2$, то ОСэцк выполняется либо двумя реле сопротивления с характеристиками, удаленными не менее чем на $0,25Z_p$ от годографов внешнего асинхронного хода, ориентированными у одного реле в I квадрант, у второго — в III квадрант и имеющими максимальное смещение ($C=0,2$), либо одним реле, ориентированным в III квадрант и имеющим смещение в I квадрант.

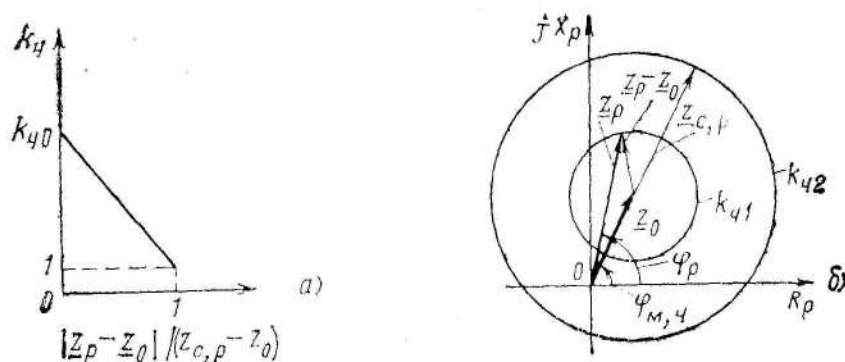


Рис. 19. Определение k_q реле сопротивления:

а — зависимость k_q от удаленности конца вектора Z_p от центра характеристики реле (при моменте на реле, равном моменту сопротивления, $k_q=1$); б — векторы и изолинии, характеризующие чувствительность реле сопротивления с круговой характеристикой

Следует отметить, что два реле сопротивления необходимы в том случае, если годографы Z_p при АР по контролируемому сечению проходят близко к началу координат или в III квадранте; вместо них может быть использовано одно реле полного сопротивления.

Если окажется, что векторы расположены в одном квадранте

(по одну сторону от начала координат), $Z_{c,p}^I$ и $Z_{c,p}^{II}$ то требуется соответствующий перенос устройства АЛАР.

5. Проверяется чувствительность реле сопротивления в двух заранее намеченных схемах сети. Если характеристика ОСэцк выполняется двумя реле, то чувствительность проверяется также для схемы, при которой годограф Z_p проходит через точки пересечения характеристик этих реле. Коэффициент чувствительности проверяется

по выражению [13, 15]:

$$k_q = 30 - 29 |Z_p - Z_0| / (Z_{c,p} - Z_0), \quad (41)$$

где $|Z_p - Z_0|$ — расстояние, Ом, от центра характеристики срабатывания реле Z_0 до рабочей точки, в качестве которой берется ближайшая к центру характеристики точка годографа Z_p (рис. 19).

Значение R_{ch} в зависимости от точности расчетов должно быть не меньше 12—15; для схемы с Z_p , проходящим близко к началу координат, и ОСэцк, состоящим из двух реле, допустимо $k_q \geq 10$.

6. Для каждого из указанных выше годографов, а также для годографа Z_p в схеме, обуславливающей максимальное скольжение при АР, определяется интервал углов $\Delta\delta$, на котором выполняется условие срабатывания ОСэцк:

$$\Delta\delta = |\delta_c - \delta_B|, \quad (42)$$

где δ_c , δ_B — углы срабатывания и возврата ОСэцк соответственно.

По известному R_{ch} определяется минимальный, необходимый для

срабатывания ОСэцк, интервал времени Δt , с, в течение которого выполняется условие срабатывания ОСэцк. (рис. 20).

Определяются скольжения отказа, Гц, в этих схемах по формуле

$$S_{\text{отк}} = 0,0028 \Delta \delta / \Delta t. \quad (43)$$

Полученное значение $S_{\text{отк}}$ должно быть больше значения, которое соответствует данному АР (табл. 9).

При построении годографа Z_p в координатах времени (по результатам расчетов динамической устойчивости) $S_{\text{отк}}$ определяется по выражению

$$S_{\text{отк}} = \Delta t_{\text{сущ}} / (k_n \Delta t_{\text{тр}} T_{a,x}), \quad (43a)$$

где $\Delta t_{\text{сущ}}$ — время существования условий для срабатывания ОСэцк, с, определяемое как продолжительность годографа, ограниченного характеристикой срабатывания ОСэцк; $\Delta t_{\text{тр}}$ — время, с, требуемое для срабатывания ОСэцк в соответствии с определенным R_n , находится по рис. 20; $T_{a,x}$ — период цикла, определяемый по продолжительности годографа за цикл асинхронного хода; $R_n = 1,1 \div 1,2$ — коэффициент надежности.

7. Если значения $S_{\text{отк}}$ или R_n в одной из рассматриваемых схем излишне велики, а в другой неудовлетворительны, то выбирается другая характеристика срабатывания ОСэцк и повторяется расчет по пп. 2—6.

Выполнение коррекции возможно, например, путем уменьшения смещения или отказа от смещения характеристики срабатывания, если все годографы Z_p проходят выше ее центра; это увеличивает в данном случае R_n , хотя и уменьшает интервал углов $\Delta \delta$, в котором выполняется условие срабатывания ОСэцк, (см. рис. 20).

Если чувствительность устройства или его скольжение отказа недостаточны, то следует рассмотреть другое место установки устройства или предусмотреть установку второго устройства, на отдельную группу расчетных схем сети.

Расчет ОСс,ц, если используется I ступень. К работе ОСс,ц предъявляется более жесткое требование, чем к ОСэцк так как требуется синхронизация его действия с действием реле мощности KWI .

1. По характеристикам S_p определяется среднее значение угла $\varphi_{\text{бкр}}$, в схемах, предусматривающих АР по контролируемому сечению:

$$\varphi_{\text{бкр}}^{\text{ср}} = \sum_1^n \beta_i \varphi_{\text{бкр}i} / \sum_1^n \beta_i, \quad (44)$$

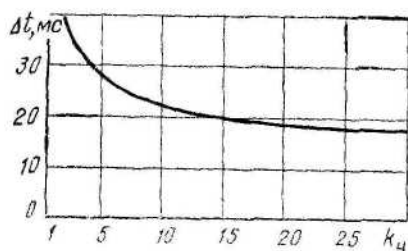


Рис. 20. Зависимость времени существования условия срабатывания $OC_{ЭЦК}$ необходимого для его срабатывания, от $k_ч$

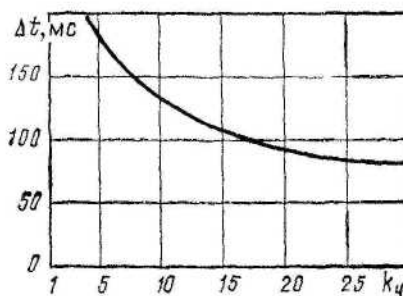


Рис. 21. Зависимость времени существования условия срабатывания $OC_{с.ц.}$ необходимого для его срабатывания, от $k_ч$

где $\phi_{кр i} = \arctg(Q/P)$ определяется для i -й схемы в точке годографа S_p , соответствующей критическому углу $\delta = \delta_{кр}$

В качестве угла максимальной чувствительности реле $\phi_{м,ч}$ выбирается один из двух заводских (80° или 65°), ближайший к полученному среднему значению.

2. Если $\phi_{м,ч}$ по предыдущему расчету совпадает с ранее вычисленным $\phi_{м,ч}$, то в дальнейшем расчет выполняется, как рассмотрено ниже.

3. Проверяется возможность использования $OC_{ЭЦК}$ в качестве $OC_{с.ц.}$. По известному $R_ч$, определяется минимальный, необходимый для срабатывания $OC_{с.ц.}$ интервал времени Δt , с, в котором выполняется условие срабатывания $OC_{с.ц.}$ (рис. 21).

Скольжение отказа, Гц, рассчитывается по формуле

$$s_{отк,с} = 0,0028 (\Delta\delta - 2\delta_{см}) / \Delta t, \quad (45)$$

где $\delta_{см}$ — угол между серединой интервала $\Delta\delta$ и углом, при котором выполняется условие срабатывания (возврата) реле мощности $KW1$.

Полученное значение $S_{отк,с}$ должно быть больше значения, которое соответствует данному AP и определяется по табл. 9, 10 и 11, в которых $P_{пер}$ — мощность в сечении асинхронного хода, передаваемая в исходном режиме; $P_{н1}$, $P_{н2}$ — максимальная

Таблица 9. Ожидаемое скольжение в 1-м цикле

$P_{пер}/P_{н2}$	$s_{ож}$ при различных $P_{пер}/P_{н1}$			
	0,01	0,1	1	10
0,01	0,4	0,7	1,5	2
0,1	0,8	1	2	2,5
0,5	2,4	2,5	3	3,5
0,8	6,2	6,5	7,5	8

Таблица 10. Ожидаемое скольжение в 4-м цикле

$P_{\text{пер}}/P_{\text{н2}}$	$s_{\text{ож}}$ при различных $P_{\text{пер}}/P_{\text{н1}}$			
	0,01	0,1	1	10
0,01	0,6	2	4	6
0,1	2,2	3,5	5	6,5
0,5	6	6,5	9	11
0,8	6,5	7	10	12

Таблица 11. Ожидаемое скольжение при установившемся АР

$P_{\text{пер}}/P_{\text{н2}}$	$s_{\text{ож}}$ при различных $P_{\text{пер}}/P_{\text{н1}}$			
	0,01	0,1	1	10
0,01	0,4	0,5	1,4	2,8
0,1	2	2,2	3,1	4
0,5	2,1	2,3	3,2	4,1
0,8	2,2	2,4	3,3	4,2

нагрузка в отправной и приемной энергосистемах; взаимное скольжение дано в герцах. Ожидаемое взаимное скольжение на 2-м или 3-м цикле асинхронного хода получается линейной интерполяцией значений табл. 9 и 10.

4. Проверяется скольжение отказа, Гц, в зоне возврата $OC_{C, \text{ц}}$ в цикле асинхронного хода по формуле

$$S_{\text{отк, в}} = (360 - \Delta\delta) / 11. \quad (46)$$

Полученное значение $S_{\text{отк, в}}$ должно быть больше значения, которое соответствует данному АР и определяется по табл. 9—11.

При удовлетворительности результатов расчета $OC_{C, \text{ц}}$, имеющего характеристику $OC_{\text{эцк}}$, последний может быть исключен из схемы устройства АЛАР.

5. Если $S_{\text{отк}}$ по пп. 4 или 3 меньше необходимого для данных расчетных схем, то характеристика срабатывания $OC_{C, \text{ц}}$ выбирается только по условию отстройки от рабочего режима (40); тем самым допускается срабатывание $OC_{C, \text{ц}}$ при внешних АР и качаниях. Проверяется чувствительность реле по сопротивлению и скольжению отказа по (45), (46).

6. Если $S_{\text{отк}}$ по (46) меньше необходимого, а по (45) удовлетворительно, то производится коррекция характеристики $OC_{C, \text{ц}}$ с целью сближения значений $S_{\text{отк}}$ и повторный расчет.

Если $\phi_{\text{м, ч}}$ по п. 1 данного расчета не совпадает с $\phi_{\text{м, ч}}$ по (38), то в дальнейшем расчет $OC_{C, \text{ц}}$ ведется только по условию отстройки от рабочего режима в соответствии с пп. 5, 6.

Расчет $OC_{C, \text{ц}}$, если не используется I ступень. Расчет выполняется в соответствии с пп. 3—6 предыдущего расчета. При неудовлетворительности результатов расчета $OC_{C, \text{ц}}$ и малом скольжении, ожидаемом на 1-м цикле (см. табл. 9), целесообразно рассмотреть вопрос об использовании I ступени.

Расчет $OC_{\text{н, ц}}$. Расчет сводится к расчету грубого реле сопротивления $KZ_{\text{Г}}$. Расчет чувствительного реле $KZ_{\text{ч}}$ выполняется аналогично $OC_{C, \text{ц}}$

1. Угол максимальной чувствительности характеристики $KZ_{\text{Г}}$ берется таким же, как и для $OC_{C, \text{ц}}$ при использовании I ступени.

При использовании $OC_{\text{эцк}}$ характеристика срабатывания $KZ_{\text{Г}}$ строится в

соответствии с расчетом $OC_{ЭЦК}$. В случае выполнения одним реле сопротивления одновременно функций $OC_{ЭЦК}$ и KZ_T в $OC_{п,ц}$ характеристика этого реле выбирается с углом максимальной чувствительности, принимаемым для KZ_T .

В случае не использования $OC_{ЭЦК}$ характеристика реле KZ_r строится так, чтобы обеспечить $R_{ч} = 12 \div 15$ в расчетных схемах, требующих быстрой ликвидации АР и характеризующихся максимальным и минимальным удалением годографа Z_p от начала координат.

Проверяется, что точка годографа Z_p , соответствующая углу (δ , при котором происходит переориентация реле мощности KWI в рассматриваемой схеме, не вышла (с запасом) за пределы характеристики KZ_T . Если это условие не выполняется, то необходимо обеспечить такое взаимное размещение характеристик KZ_r и KWI , чтобы KWI успело переориентироваться до возврата KZ_T .

2. Определяется значение $R_{ч}$ во всех интересующих расчетных схемах. По известному $R_{ч}$ определяется минимальное время Δt , с, существования условия срабатывания KZ_T (см. рис. 20), необходимое для срабатывания последнего.

Определяем интервал углов $\Delta\delta$ годографа Z_p , в котором существует условие срабатывания грубого реле сопротивления KZ_T : $\Delta\delta = |\delta_{с,г} - \delta_{в,г}|$ и интервал углов годографа Z_p , в котором существует условие срабатывания собственно $OC_{п,ц}$ т. е. интервал, заключенный между характеристиками $KZ_{ч}$ и KZ_T

$$\Delta\delta_{п,ц} = |\delta_{с,г} - \delta_{с,ч}|; \quad (47)$$

$$\Delta\delta_{п,ц} = |\delta_{в,г} - \delta_{в,ч}|. \quad (47a)$$

Если АР возможен с обоими знаками скольжения, то следует выполнять расчет $\Delta\delta_{п,ц}$ отдельно для каждого случая с учетом своего $S_{ож}$.

3. По формуле (43) определяется $S_{отК}$ реле KZ_T , с использованием рис. 20 для определения Δt .

4. Проверяется скольжение отказа, Гц, при прохождении годографом Z_p интервала углов $\Delta\delta_{п,ц}$ в соответствии с формулой (при $t_{кт1} = 0,2$ с)

$$S_{отК} = 0,014 \Delta\delta_{п,ц}. \quad (48)$$

Если наименьшее из значений $S_{отК}$ по пп. 3, 4 удовлетворяет требованиям табл. 9 для данной схемы АР, то расчет заканчивается.

5. Если расчет по пп. 3, 4 не обеспечивает необходимого значения $S_{отК}$, причем лимитирующим является значение по формуле (48), то с целью улучшения настройки ОС из расчета получения большего $\Delta\delta_{п,ц}$ выбирается другая характеристика срабатывания реле KZ_r . Эта коррекция возможна путем снижения $R_{ч}$ до 7—10 или путем использования эллиптической характеристики с сопротивлением срабатывания, равным сопротивлению срабатывания круговой характеристики, и соотношением осей $t = 0,84 \div 0,5$.

Повысить $S_{отк}$ I ступени возможно также с помощью следующих приемов:

а) ухудшением отстройки от КЗ, обуславливающих разновременное срабатывание чувствительного и грубого реле сопротивления. Это достигается уменьшением выдержки времени срабатывания реле KTI . Включение обоих реле на одно напряжение делает этот путь обоснованным и достаточно эффективным. Уставка KTI должна выбираться по результатам соответствующих испытаний;

б) снижением селективности или полным отказом от нее относительно внешнего АР, что достигается увеличением характеристики срабатывания чувствительного реле сопротивления;

в) если АР возможен только с одним знаком скольжения, то увеличением отрезка дуги годографа сопротивления между характеристиками срабатывания чувствительного и грубого реле сопротивления, достигаемого установкой разных углов максимальной чувствительности этих реле;

г) увеличением дуг годографа сопротивления между характеристиками срабатывания чувствительного и грубого реле сопротивления, за счет применения характеристик грубого реле в виде эллипса. Для компенсации получаемого при этом замедления действия грубого реле предлагается (предложено СРЗА ОДУ Урала) растянуть зону его срабатывания до возврата чувствительного реле: зону bc (рис. 22,а) растянуть до зоны bd или cb —до cd при другом знаке скольжения. Схемная реализация такого решения показана на рис. 22,б; она возможна только при включении ОС по вариантам 2а и 4а (см. табл. 3) и требует дополнительной установки промреле $KL30$ и резистора $R30$;

д) если отказ I ступени обусловлен отказом выявительного органа счетчика циклов, а характеристика срабатывания $ОС_{с,и}$, выполняющего также функции чувствительного реле сопротивления, отстроена только от сопротивления нагрузки, то увеличением характеристики $ОС_{с,ц}$ с компенсацией этого увеличения изменением угла максимальной чувствительности характеристики в направлении большей отстройки от сопротивления нагрузки. При этом сопротивление срабатывания, вычисленное по (40), увеличится, что обусловит увеличение дуги годографа сопротивления, охватываемой характеристикой $ОС_{с,ц}$. Помимо того, целесообразно осуществить смещение характеристики срабатывания реле мощности таким образом, чтобы условия его переориентации наступали несколько раньше, чем будет достигнут критический угол.

При недостаточности мероприятий по пп. «а-г» следует проверить работоспособность второй или третьей ступени устройства

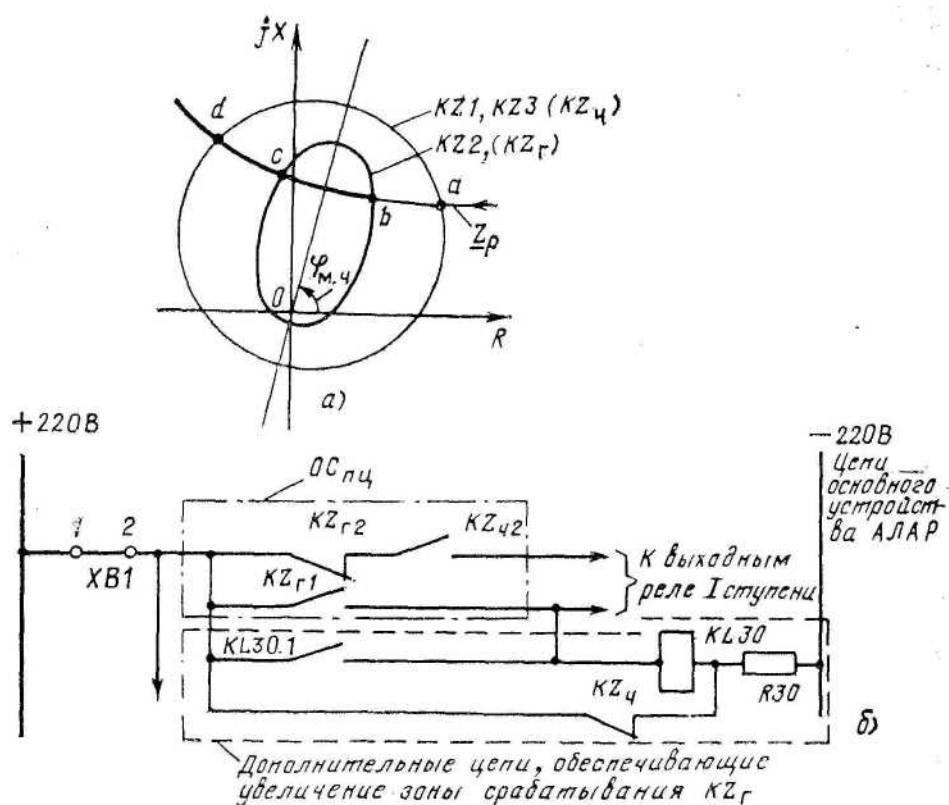


Рис. 22. Схемный вариант повышения скольжения отказа I ступени основного устройства АЛАР (предложение СРЗА ОДУ Урала):
а — поясняющая диаграмма; б — цепи оперативного тока

(при установившемся скольжении), обеспечив ее в крайнем случае неселективной настройкой выявительного органа второй ступени, или использовать простые неселективные делительные устройства по типу [8].

6. После коррекции повторяются расчеты по пп. 2—4.

В случае использования реле KZ_r , с эллиптической характеристикой скольжение его отказа, $\Gamma_{ц}$, определяется по формуле

$$S_{отк} = 0,0019 \Delta \delta / \Delta t, \quad (48a)$$

а скольжение отказа собственно $OC_{пц}$ — по формуле

$$S_{отк} = 0,011 \Delta \delta_{п.ц}. \quad (486)$$

Расчет KWI , если используется I пупень.

1. Для схем, в которых ЭЦК расположен и контролируемой $OC_{ЭЦК}$ зоне ($OC_{сц}$, еедп не используется $OC_{эцк}$), строятся годографы S_p с нанесенными на них значениями углов δ .

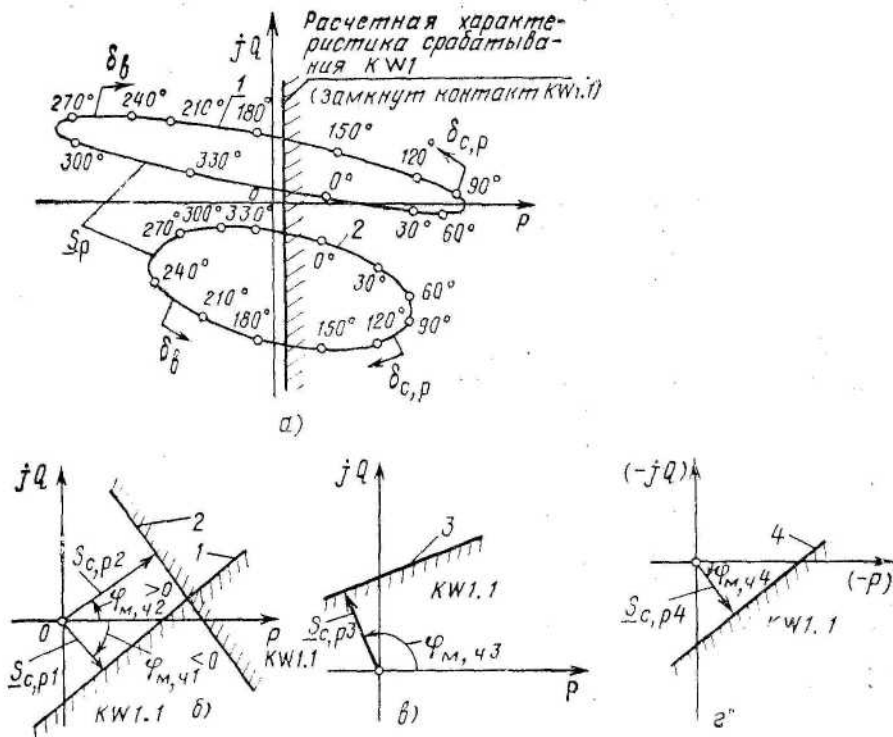


Рис. 23. Характеристики срабатывания реле мощности $KW1$:

a — пример выбора характеристики срабатывания для конкретного объекта; b — поясняющие диаграммы при размещении начала координат вне зоны срабатывания; $в$, $г$ — поясняющие диаграммы при размещении начала координат в зоне срабатывания

2. Характеристика срабатывания $KW1$, желательная для данной схемы, проводится через две точки годографа S_p : одну — соответствующую углу $\delta_{кр}$, вторую — соответствующую углу δ в середине интервала, в котором выполняется условие возврата $OC_{с,ц}$.

3. Характеристика срабатывания $KW1$ может выбираться графическим путем. В этом случае рекомендуется проводить ее через две точки, из которых:

одна — средняя из точек, лежащих на годографах S_p , соответствующих расчетным режимам и характеризующих середины интервалов углов $\Delta\delta$, в которых выполняется условие срабатывания $OC_{с,ц}$

вторая — средняя из точек, лежащих на тех же годографах S_p и характеризующих середины интервалов углов, в которых выполняется условие возврата $OC_{сл}$.

Если расчетные годографы S_p размещаются по разные стороны от оси абсцисс (годографы 1 и 2 на рис. 23, a), что характерно при расположении ЭЦК по разные стороны от места установки АЛАР, то характеристику срабатывания $KW1$ целесообразно проводить через середины зон срабатывания $OC_{с,ц}$, пренебрегая «уходом» от середины его зон возврата (см. п. 4).

4. Оценивается отклонение построенной характеристики $KW1$ от желательной для всех схем как разница между углами δ пересечения годографа S_p желательной и выбранной характеристиками $KW1$ в зоне срабатывания

$OC_{с,ч}$ ($\delta_{см}$) и в зоне возврата $OC_{с,ч}$ ($\delta_{см,в}$)- Оно не должно превышать $\delta_{см}=10^\circ$ и $\delta_{см,в}=20^\circ$.

5. Для принятой характеристики срабатывания KWI (например, 1 и 2 на рис. 23,а) определяются параметры срабатывания реле:

$S_{с,р}$ — мощность срабатывания, как расстояние от начала координат до линии нулевых моментов ($S_{с,р1(2)}$ на рис. 23,б); $S_{с,р}>0$, если $-90^\circ < \varphi_{м,ч} < 90^\circ$, и $S_{с,р}<0$, если $90^\circ < \varphi_{м,ч} < -90^\circ$;

$\Phi_{м,ч}$ — угол максимальной чувствительности и (угол между положительным направлением оси P и $S_{с,р}$, рис. 23,б). Если начало координат находится в зоне срабатывания реле мощности ($S_{с,р3} > \Phi_{м,ч,3}$ на рис 23,в), то в расчетах принимается $\Phi_{м,ч}$ реле, ориентированного в обратную сторону ($\Phi_{м,ч,4}$, $S_{с,р4}$ на рис. 23,г). Поскольку характеристику 3 (рис. 23,в) нельзя получить простыми средствами, к KWI следует подвести напряжение (или ток) обратной полярности, т. е. принять в качестве положительных направлений $-P$ и $-Q$. Тогда область срабатывания KWI (замыкание контакта $KWI.1$) будет отражена характеристикой 4 на рис. 23,г, а сигналу «АР с ускорением» будет соответствовать АР с торможением генераторов, расположенных за шинами (за «спиной» устройства).

В качестве KWI в устройстве используется реле реактивной мощности РБМ-276 с внутренним углом максимальной чувствительности $\Phi_{м,ч,в} = -90^\circ \pm 3-5^\circ$ или реле активной мощности РБМ-275 с $\Phi_{м,ч,в} = 0^\circ$. Как правило, используется реле РБМ-276, как имеющее более широкие регулировочные возможности и меньшую угловую погрешность. Если же потребление по цепям напряжения лимитируется, то используется РБМ-275 (если при этом возможно обеспечить требуемый $\Phi_{м,ч}$). Для получения характеристики реле с заданным $\Phi_{м,ч}$ к реле требуется подвести фазное (междуфазное) напряжение, сдвинутое относительно вектора подводимого тока на угол $\varphi = \varphi_{м,ч}^{ср} - \varphi_{м,ч,в}$ в сторону отставания при $\varphi > 0^\circ$ и в сторону опережения при $\varphi < 0$ (отсчет $\varphi_{м,ч}^{ср}$ и $\varphi_{м,ч,в}$ от вектора тока). Для облегчения определения фаз напряжения и тока, которые надо подвести к KWI для получения требуемого угла $\Phi_{м,ч}$, можно воспользоваться расчетной табл. 12 (предложение Средне-Азиатского отделения Энергосеть-проекта). Она соответствует условию срабатывания реле РБМ-276 при емкостном характере измеряемой мощности, а реле РБМ-275 — при положительном значении активной мощности.

Расчет выдержки времени контроля длительности цикла асинхронного хода (реле $KT2$). Вы-

Таблица 12. Подключение цепей тока и напряжения реле мощности для обеспечения требуемого угла максимальной чувствительности

РБМ-276		РБМ-275	
$\varphi_M, \text{ ч}$	Подключение цепей тока и напряжения	$\varphi_M, \text{ ч}$	Подключение цепей тока и напряжения
$-165 \div -135^\circ$	$\underline{I_A}; -\underline{U_B}$	-150°	$\underline{I_A}; \underline{U_{CA}}$
$-135 \div -105^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{AB}}$	-120°	$\underline{I_A}; \underline{U_C}$
$-105 \div -75^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_A}$	-90°	$\underline{I_A}; \underline{U_{CB}}$
$-75 \div -45^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{AC}}$	-60°	$\underline{I_A}; -\underline{U_B}$
$-45 \div -15^\circ$	$\underline{I_A}; -\underline{U_C}$	-30°	$\underline{I_A}; \underline{U_{AB}}$
$-15 \div 15^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{BC}}$	0°	$\underline{I_A}; \underline{U_A}$
$15 \div 45^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_B}$	30°	$\underline{I_A}; -\underline{U_{AC}}$
$45 \div 75^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{BA}}$	60°	$\underline{I_A}; -\underline{U_C}$
$75 \div 105^\circ$	$\underline{I_A}; -\underline{U_A}$	90°	$\underline{I_A}; \underline{U_{BC}}$
$105 \div 135^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{CA}}$	120°	$\underline{I_A}; \underline{U_B}$
$135 \div 165^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_C}$	150°	$\underline{I_A}; \underline{U_{BA}}$
$165 \div 195^\circ$	$\underline{I_A}; \underline{U_{CB}}$	180°	$\underline{I_A}; -\underline{U_A}$

держка времени реле $KT2$ определяется условием отстройки от максимального для контролируемого сечения периода асинхронного хода, при котором наступает ресинхронизация,

$$t_{KT2} = k_n T_{\text{доп}}, \quad (49)$$

где $k_n=1,1$ — коэффициент надежности; $T_{\text{доп}}$ — период допустимого скольжения в схеме, обуславливающей его максимальное значение.

Расчет выдержки времени III ступени. Выдержка времени III ступени осуществляется с помощью реле $KT3$ и $KT4$. Они вводятся в работу при выполнении ресинхронизации.

Время с момента возникновения АР до момента действия III ступени устройства включает в себя три составляющие:

время прохождения контролируемого количества циклов в начале АР;

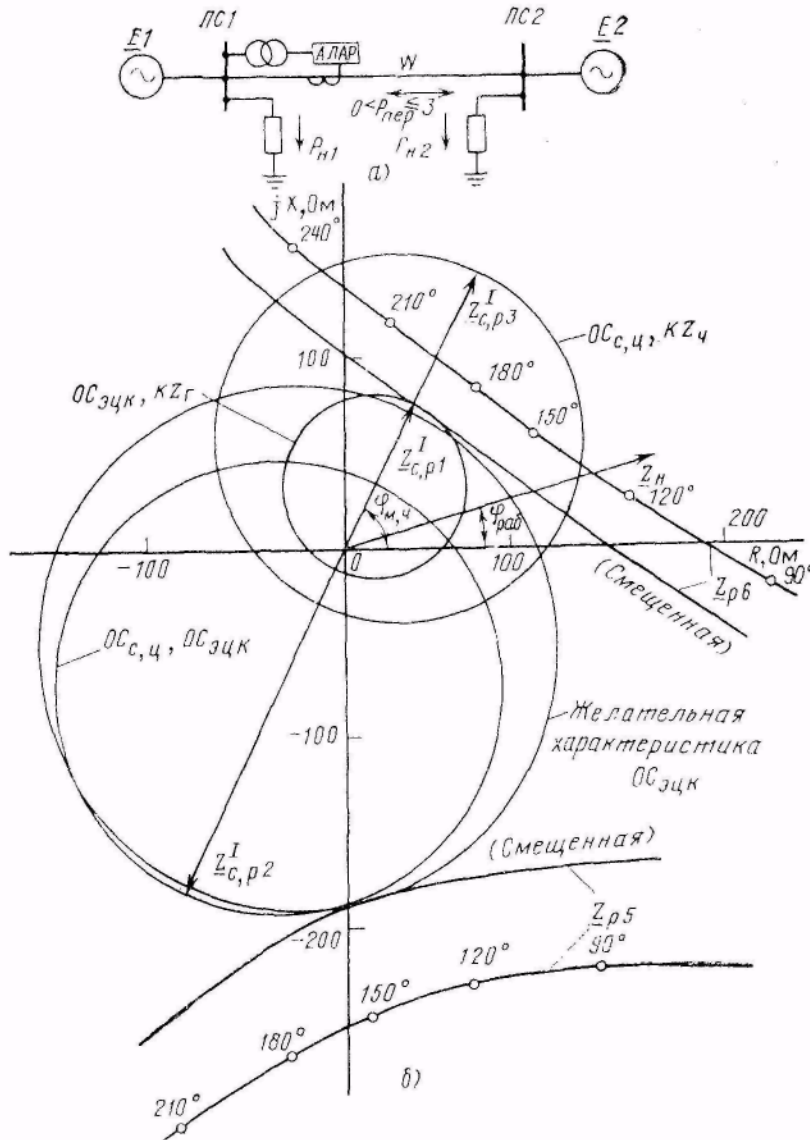
дополнительную выдержку времени, вводимую для осуществления ресинхронизации;

время прохождения контролируемого количества циклов в конце процесса ресинхронизации.

Суммарное время второй и третьей составляющих ограничено максимальной суммарной выдержкой времени реле $KT3$ и $KT4$ и составляет 40 с. Расчет выполняется в следующем порядке.

1. Определяется разность выдержек времени на контактах $KT4.2$ и $KT4.3$ по условию достаточности времени для фиксации контролируемого количества циклов асинхронного хода с периодом до критического:

$$\Delta t_{KT4} = t_{KT4.3} - t_{KT4.2} = k_{\text{н}} n T_{\text{доп}}, \quad (50)$$



где $R_{\text{н}} = 1,1 \div 1,2$ — коэффициент надежности; n — количество контролируемых циклов; $T_{\text{доп}}$ — период допустимого скольжения в той схеме-, в которой выполняется ресинхронизация.

2. Задается дополнительная выдержка времени (обычно определяется в расчетах ресинхронизации и находится в пределах 10—20 с), но не более

$$t_{\text{доп}} \leq (40 - \Delta t_{KT4}). \quad (51)$$

Расчет выдержки времени реле сигнализации неисправности устройства. Выдержка времени на реле $KT5$, если применяется ресинхронизация, определяется условием отстройки от дополнительной выдержки времени:

$$t_{KT5} = t_{доп} + \Delta t, \quad (52)$$

где $\Delta t \approx 2T_{доп}$ — ступень селективности.

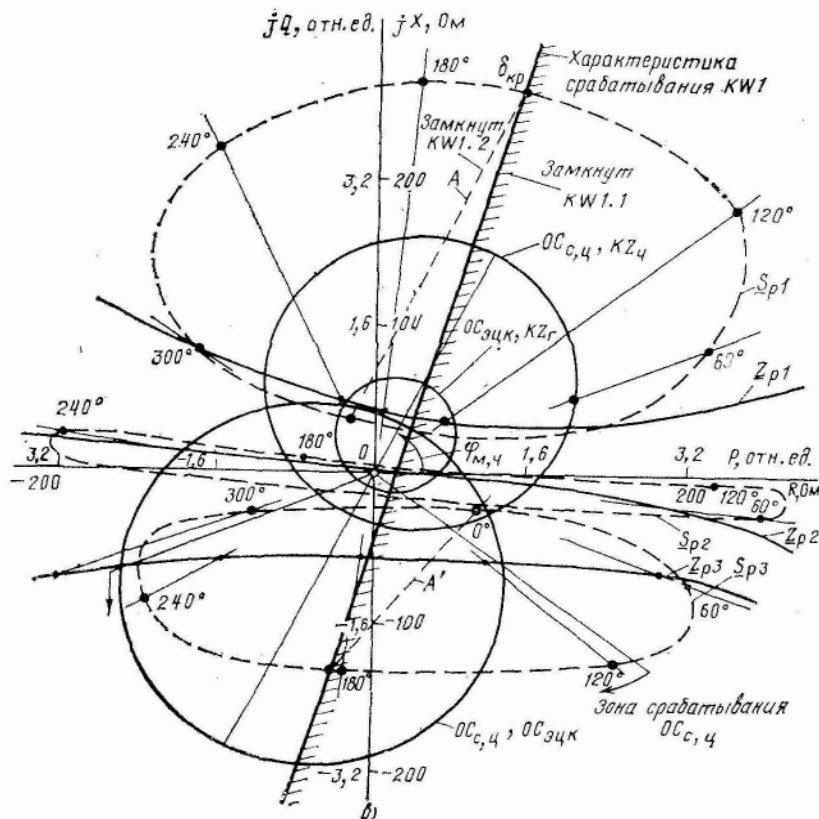


Рис. 24. Пример расчета основного устройства АЛАР:
а — схема электропередачи; б — выбор характеристик $OC_{ЗЧК}$ и $OC_{C, U}$; в — определение параметров срабатывания устройства

Если ресинхронизация не Применяется, то выдержка времени на реле $KT5$ может быть установлена равной $2T_{доп}$.

Пример расчета основного устройства. На рис. 24 и в табл. 13—18 дан пример расчета основного устройства АЛАР. Предполагается использование всех трех ступеней устройства, установленного на линии W со стороны HCl Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. С целью выбора параметров срабатывания OC и KWI рассмотрено шесть исходных схем сети, из которых расчетными оказались 1, 2, 3, 5, 6. При этом для схем 5 и 6 имеет место внешний ЛР, схема 2 характеризуется максимальным режимом работы станций, схема 3 — делением системы и узле ПС2, схема 1 — делением и минимальном режиме. Схема 4 не является расчетной, поскольку характеристика Z_{p4} проходит между характеристиками Z_{p1} и Z_{p2} , т. е. благоприятна (рис. 24, в); ожидаемые значения скольжений, рассчитанные в соответствии с табл. 9- -11, в схеме 4 такие же, как в схеме 2 (в табл. 13 не показаны).

Исходными данными при выборе характеристик пусковых органов являются характеристики Z_p и $S_p = f(\delta)$ полученные для каждой схемы расчетом на ЭВМ. Эти характеристики в первичных значениях сопротивлений и относительных единицах (отн. ед.) мощностей даны на рис 24, б, в и имеют тот же индекс, что и номер схемы. Точки равных углов δ характеристик Z_p и S_p одной

схемы находятся на линии, проходящей через начало координат с углом $\varphi = \arctg(X/R) = \arctg(Q/P)$. Расположение годографов Z_{p1} и Z_{p3} по разные стороны от начала координат говорит о необходимости включения контактов OC по варианту 46 (см.табл. 3). Для рассматриваемых схем с АР по контролируемому сечению $\delta_{кр}$ принято равным $180—160^\circ$. Все исходные данные, в том числе полученные расчетным путем, помещены в табл. 13.

2. Выбор характеристики срабатывания $OC_{эцк}$ начинается с определения Fp^{cp}/min . В соответствии с построенными годографами Z_p (рис 24,в) этот угол ближе к 80° , чем к 65° . Однако, учитывая, что в устройстве используется I ступень и $\varphi_{кр} \approx 160 \div 180^\circ$ (см. табл. 13), следует выбрать $\varphi_{кр} = 65^\circ$ так как он больше соответствует принятому- $\varphi_{кр}$.

Желательная характеристика $OC_{эцк}$ отстраивается от характеристик Z_{p5} и Z_{p6} внешних ЛР и заменяется вписанными в нее двумя характеристиками срабатывания в виде окружностей с сопротивлениями срабатывания $Z'_{c,p1} = 80 \text{ Ом}$ и $Z'_{c,p2} = 200 \text{ Ом}$, имеющими смещения соответственно в III ($C=20\%$) и I ($C=20\%$) квадранты ($OC_{эцк}$ на рис. 24,б и в табл. 14). Поскольку характеристика $OC_{эцк}$ в I квадранте выполняет функции KZ_T , уставка $Z'_{c,p}$ по результатам расчета $OC_{п.ц}$ по пп. 2—6 (здесь не приводится) принята меньшей выбранной по условию отстройки от внешнего АР (60 вместо 80 Ом) с тем, чтобы обеспечить большее скольжение отказа в 1-м цикле.

Вариант применения $OC_{эцк}$ с эллиптической характеристикой не дал лучших результатов, поскольку увеличение интервала углов $\Delta\delta_{нц}$ не компенсирует увеличение времени срабатывания реле ДТ/, необходимое при этом для отстройки от КЗ.

Проверка отстройки от максимального рабочего режима показала, что $Z'_{c,p1}$ более чем вдвое меньше Z_n (рис. 24,б).

Результаты проверки чувствительности $OC_{эцк}$ в трех схемах с использованием графических данных рис. 24,в сведены в табл. 14. При этом проверка

Таблица 13. Исходные данные

Схема сети	Узел, примыкающий к						$T_{J эк}, c$
	ПС1			ПС2			
	$P_{T1 ном'}$ отн. ед.	$T_{J1 ном'}$ с	T_{J1}, c	$P_{T2 ном'}$ отн. ед.	$T_{J2 ном'}$, с	T_{J2}, c	
1	23	9,1	210	27	8,05	217	109
2	33	9,55	310	72	8,25	594	204
3	33	9,55	310	27	8,05	217	180

Продолжение табл. 13

Схема сети	$\delta_{кр}, град$	$P_{пер'}$ отн. ед.	$\frac{P_{пер}}{P_{н1}}$	$\frac{P_{пер}}{P_{н2}}$	Ожидаемое скольжение $s_{ож}, Гц$		
					на 1-м цикле	на 4-м цикле	при установившемся АР
1	160—180	3	0,15	0,1	1	3,6	2,3
2	160—180	3	0,1	0,04	0,8	2,4	1,1
3	—	3	0,1	0,1	1	3,5	2,2

Примечание. T_{J1} и T_{J2} определяются по выражению $T_{J1(2)} = P_{T1(2) ном'} T_{J1(2) ном'}$.

Таблица 14. Выбор характеристики срабатывания ОС ЭЦК

Схема сети	$Z_{p min}, \text{ Ом}$	Определение $\varphi_m, \text{ ч}$		Реле				k_q	Скольжение отказав в ра- счетных схемах сети		
				ориенти- ровано в I квад- рант		ориенти- ровано в III квад- рант					
		$\varphi_{p min}, \text{ град}$	$\varphi_m, \text{ ч}$ (при- нят по табл. 15), град	$Z_{с, p1}^I, \text{ Ом}$	$C, \%$	$Z_{с, p2}^I, \text{ Ом}$	$C, \%$		$\Delta t, \text{ с}$	$\Delta \delta, \text{ град.}$	$s_{отк}, \text{ Гц}$
1	30	80	65	60	20	—	—	14,4	0,02	115	16
2	0	80	65	60	20	200	20	10/10	0,021	40/110	5,3/14,5
3	—60	90	65	—	—	200	20	24,9	0,018	135	21
4	12	80	65	—	—	—	—	—	—	—	—
5 (внеш- ний АР)	—240	—	65	—	—	Отстрое- но от схемы 5		—	—	—	—
6 (внеш- ний АР)	110	—	65	Отстрое- но от схемы 6		—	—	—	—	—	—

Таблица 15. Выбор характеристики срабатывания $OC_{с,ц}$

Схема сети	Определение $\varphi_{м, ц}$				Реле				$k_{ц}$	Скольжение отказа в расчетных схемах сети			
	$\varphi_{кр}$, град	$\varphi_{м, ц}$, град		ориенти- ровано в I квад- рант		ориенти- ровано в III квад- рант		Δt , с		$\Delta \delta$, град	$s_{отк. ср}$, Гц	$s_{отк. в}$, Гц	
		есть $OC_{п, ц}$	нет $OC_{п, ц}$	$Z_{с, р3}$, Ом	C , %	$Z_{с, р2}$, Ом	C , %						
1	70	65	—	162	20	—	—	24,15	0,086	240	7,8	11	
2	—	65	—	162	20	200	20	10/10	0,138	110/110	2,2	22	
3	—	65	—	—	—	200	20	24,9	0,086	135	4,4	20,5	

Таблица 16. Выбор характеристики срабатывания $OC_{п,ц}$

Схема сети	$\varphi_{м,ц}$ град	Характери- стика сраба- тывания реле $KZ_{ц}$		Характеристика сра- батывания реле $KZ_{г}$			$k_{ц,г}$	Скольжение отказа в расчет- ных схемах сети				
		$Z_{с,р1}, Ом$	$C, \%$	$Z_{с,р1}, Ом$	$C, \%$	l		$\Delta t, с$	$\Delta \delta_{г}, град$	$s_{г}, Гц$	$\Delta \delta_{п,ц}, град$	$s_{п,ц}, Гц$
1	65	162	20	60	20	1	14,4	0,02	115	16	70	1
2	65	162	20	60	20	1	10	0,021	40	5,3	50	6,7

Таблица 17. Выбор характеристики срабатывания KWJ

Схема сети	Характеристика реле		$\delta_{см}, град$	$\delta_{см}, в, град$	Параметры реле			
	$\varphi_{м,ц}, град$	$S_{с,р}, МВ\cdot А$			Тип KWJ	$\varphi_{м,ц}, в, град$	Подводимый ток	Подводимое напряжение
1	—20	100	0	13	РБМ-276	—80	I_A	U_{OC}
2	—20	100	5	5				
3	—20	100	0	17				

Таблица 18. Выбор выдержек времени основного устройства

$T_{Jmax}, с$	$P_{пр,д}, отн. ед.$	$T_{доп}, с$	$t_{KT2}, с$	$t_{KT1}, с$	$t_{KT3}, с$	$t_{KT4.2}, с$	$t_{KT4.3}, с$	$t_{KT5}, с$
204	2000	2,5	2,8	0,2	10	6	12	29

Примечание. $n = 2$ цикла.

$R_{ц}$ оказалось для схемы 2, причем как для реле сопротивления с $Z_{с,р1}^1$ так и для реле с $Z_{с,р2}^1$.

С использованием (42), (43) и рис. 20 определяется скольжение отказа для каждой из расчетных схем; оно значительно выше ожидаемого (см. табл. 13). Результаты всех расчетов сведены в табл. 14.

3. В качестве характеристики $OC_{с,ц}$ принимается характеристика $OC_{эцк}$ с сопротивлением срабатывания $Z_{с,р2}^1 = 200$ Ом, а также характеристика, отстроенная от нагрузки Z_H , с сопротивлением срабатывания $Z_{с,р3}^1 = 162$ Ом.

чувствительности для схемы, при которой годограф Z_p проходит через точки пересечения характеристик $Z_{с,р1}^1$ и $Z_{с,р2}^1$ не проводилась, так как схема сети 1 обладает худшим по сравнению с указанной схемой значением $R_{ц}$, которое было определен о. Наименьшим значение

Результаты сопутствующих выбору характеристик расчетов сведены в табл. 15. Для схемы 2 скольжение отказа в зоне срабатывания $ОС_{с,ц}$ несколько меньше ожидаемого скольжения в 4-м цикле.

4. Расчет $ОС_{п,ц}$ при выполнении $ОС_{п,ц}$ функций чувствительного реле $KZ_{ц}$ свелся к подбору характеристики срабатывания грубого реле $KZ_{г}$. В табл. 16 сведены результаты расчета для принятого значения уставки $KZ_{г}$ $Z_{с,р}=60$ Ом.

5. Желательные характеристики срабатывания реле $KW1$ для схем 1 и 2 принятых за расчетные, проходят через точки характеристики, соответствующие $\delta KР$ и середине интервала углов зоны возврата $ОС_{с,ц}$ (на рис. 24,8 показаны пунктирными прямыми A и A'). Поскольку в схеме $ОС_{п,ц}$ не может работать, характеристика $KW1$, желательная для этой схемы, проведена через точки середины интервалов углов зоны срабатывания и зоны возврата $ОС_{с,ц}$. Принимается характеристика срабатывания $K.W1$, полученная графическим путем, как средняя из трех. Характеристика, полученная методом аналитического усреднения желательных характеристик, дала менее приемлемые результаты. Параметры характеристики срабатывания и выбор типа $KW1$ приведены в табл. 17.

Выбранная настройка устройства удовлетворительна как по коэффициентам чувствительности, так и по скольжениям отказа (см. табл. 13—17).

Исключение составляет схема 2, в которой получены пониженные значения $R_{ч}$ и $S_{отк}$. Однако $R_{ч}=10$ в этой схеме допустим, поскольку смещение характеристики $Z_{р}$ в любую сторону ведет к повышению коэффициента чувствительности в одном из реле $ОС_{эцк}$ ($ОС_{сл}$) и более четкой его работе. Полученное значение скольжения отказа счетчика циклов при фиксации четырех циклов $S_{отк} = 2,2$ Гц меньше ожидаемого скольжения 2,4 Гц. Поэтому устройство желательно настроить на фиксацию двух или трех циклов; в противном случае, если AP не разовьется в многомашинный, устройство будет действовать при установившемся режиме, когда скольжение снизится.

Действие устройства на 1-м цикле в схеме 2 не обеспечивается при передаче максимальной мощности, так как $S_{отк} < S_{ож}$. Оно может быть обеспечено, как показали расчеты, лишь при исходной передаваемой мощности, не превышающей 50 % максимальной.

6. Результаты выбора выдержек времени, выполненные в соответствии с изложенной методикой, сведены в табл. 18.

Устройство с одной ступенью. Принципиально это устройство повторяет устройство с тремя ступенями, за исключением I ступени и узла дополнительной выдержки времени. Во всем остальном оно схоже с ним. Применяется в случаях, когда не требуются выявление AP на 1-м цикле и ресинхронизация.

Устройство с пуском по току и счетчиком циклов. Устройство представляет собой упрощенный вариант основного устройства с тремя ступенями, отличаясь от него пусковым органом — реле тока вместо реле сопротивления — и отсутствием I ступени. Конструктивным

отличием является использование в схеме реле-повторителей реле тока и мощности, а также уменьшение количества фиксируемых циклов ($n=3$). Трудности настройки устрой-

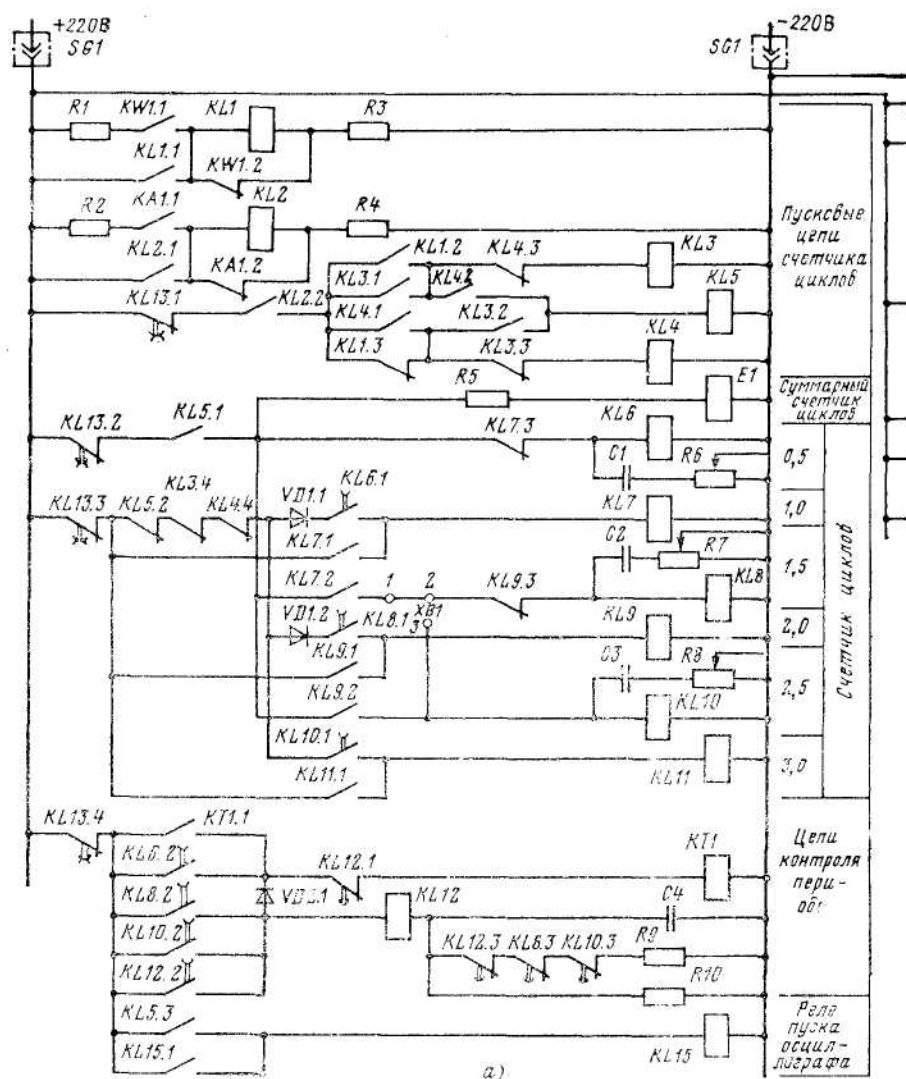
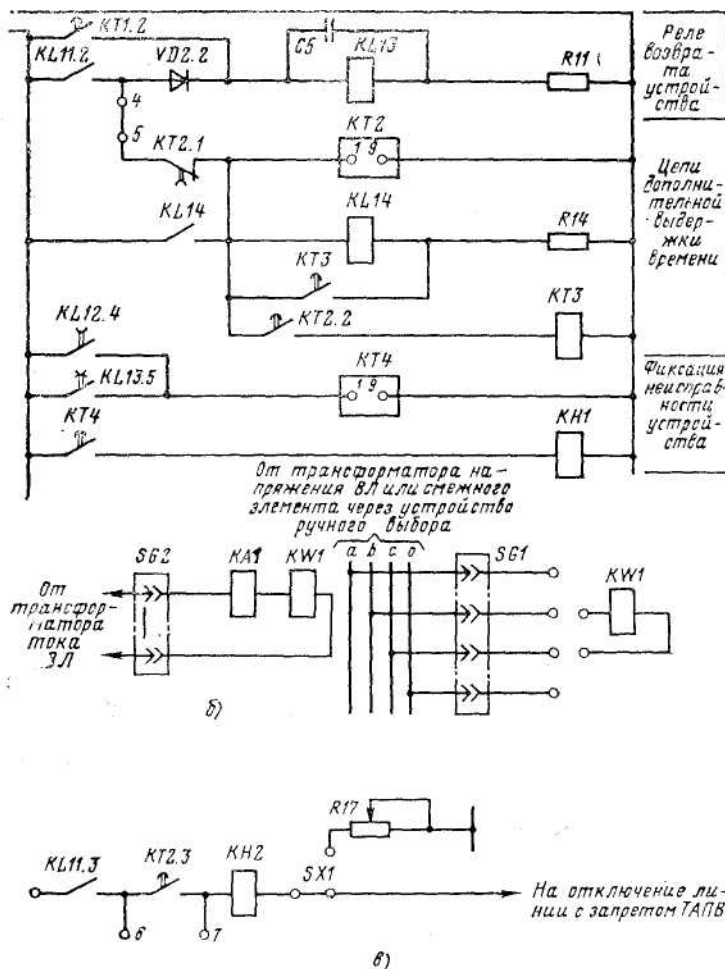


Рис. 25. Устройство АЛАР с пуском по току
а — принципиальная схема цепей постоянного тока; б — цепи переменного тока и напряжением; в — поясняющая диаграмма для

ства обусловлены применением в качестве ПО реле тока, которое реагирует на значение, но не на вектор контролируемого параметра (см. § 2), что затрудняет согласование действия реле тока и реле мощности. Устройство различает знак скольжения, но отличить АР в контролируемом сечении от внешнего АР может лишь в том случае, если существенно отличаются токи или годографы мощности в этих режимах. Трудности настройки могут привести к неселективному действию, в частности, при качаниях с малой нагрузкой [16]. Поэтому данное устройство рекомендуется применять в качестве устройства, резервирующего основное трехступенчатое или одноступенчатое, лишь



и счетчиком циклов:

ним: а — входная цепь; г — понижающая диаграмма для случая асинхронного хода с ускорением; д — диаграмма для случая асинхронного хода с торможением

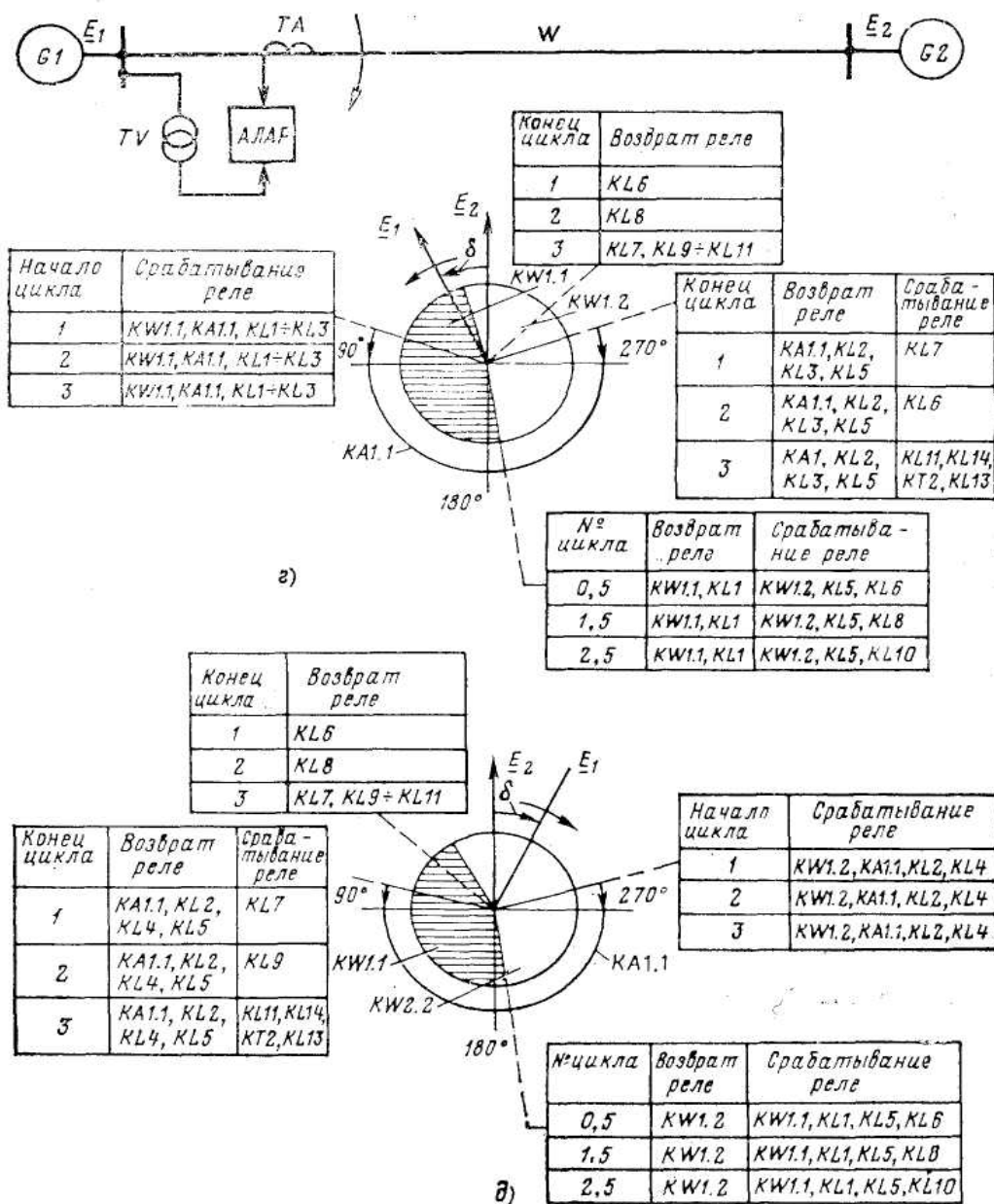


Рис. 25. Продолжение

в случаях особой опасности АР и важности быстроты его ликвидации. Вследствие большой аппаратной сложности оно менее надежно, чем резервное устройство.

Принципиальная схема устройства приведена на рис. 25,а, б, в, поясняющие диаграммы работы счетчика циклов при АР как с ускорением, так и с торможением эквивалентного генератора $G1$ относительно генератора $G2$ приведены на рис. 25,г, д. Логика действия и аппаратное исполнение устройства те же, что и у основного трехступенчатого устройства, и поэтому здесь не описываются. Выбор тока срабатывания реле тока определяется теми же условиями, что и для резервного устройства, а выбор остальных параметров должен осуществляться в соответствии с изложенными выше рекомендациями, за исключением SOTK, которое не рассчитывается.

Для исключения излишнего срабатывания устройства при малых нагрузках следует придерживаться следующих рекомендаций [16].

Границы срабатывания реле мощности $KW1$ и реле тока $KA1$ должны быть разнесены таким образом, чтобы их возвраты происходили в той же последовательности, что и их срабатывания. Если, однако, при этом область срабатывания $KA1$ будет охватывать целиком область срабатывания $KW1.1$ (или $KW1.2$), то в этом случае устройство не сумеет зафиксировать ни один цикл асинхронного хода, реагируя на них как на синхронные качания. Для правильного функционирования устройства необходимо характеристики срабатывания $KA1$ и $KW1$ выбрать так, чтобы переориентация $KW1$ (переход из зоны $KW1.1$ в зону $KW1.2$ и обратно) происходила приблизительно в середине зоны несрабатывания $KA1$. При этом сама зона должна быть велика, для чего достаточно, как правило, отстроить ток возврата $KA1$ от минимального за цикл асинхронного хода тока.

Резервное устройство АЛАР предназначено для резервирования по принципу действия основного устройства, а также для использования в качестве самостоятельного устройства при отсутствии основного. Для резервирования отказа выключателя при действии основного устройства его желательно размещать с другой стороны контролируемого участка электропередачи по отношению к основному устройству.

Принцип действия и описание схемы. Устройство выполнено на принципе фиксации колебаний тока с периодом не более расчетного в течение заданного времени. Устройство (рис. 26,а,б) состоит из реле тока $KA1$ (грубое) и $KA2$ (чувствительное); реле-повторителя действия реле тока $KL1$; реле контроля длительности периода асинхронного хода $KT1$ и $KT2$; вспомогательных реле $KL2$, $KL3$ с контурами $R3$, $C1$ и $R7$, $C2$, обеспечивающими паузу, достаточную для надежного возврата реле времени $KT1$ и $KT2$; выходных реле времени $KT3$ и $KT5$, включенных каскадно; реле $KT4$, $KN1$, предназначенных для сигнализации неисправности устройства.

При использовании одного реле *KA1* переключка устанавливается в положение 1-3 и шунтируется катушка реле *KA2*, а время возврата реле *KL2*, *KL3* устанавливается переключением конденсаторов и регулировкой резисторов *R3*, *R7*, сопротивление которых должно быть не менее 1500 Ом. Поясняющая схема включения конденсаторов *C1* и *C2* приведена в табл. 19.

В нормальном режиме реле *KT1* и *KT2* находятся в состоянии срабатывания и контакты *K.T1.1*, *KT2.1* в цепи выходного реле *KT3* разомкнуты. С помощью реле *KT3* и *KL2* сравнивается заданная длительность цикла асинхронного хода с ин-

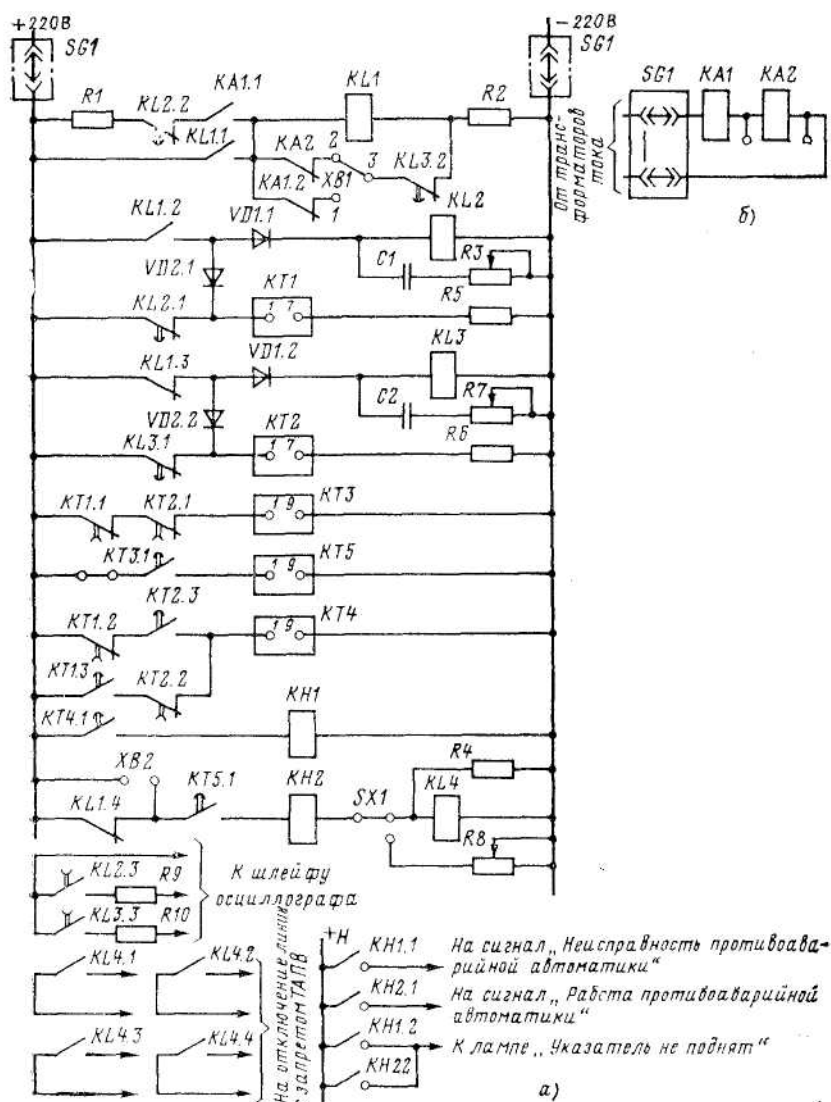
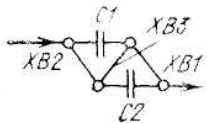


Рис. 26 (а).

Таблица 19. Включение конденсаторов

Поясняющая схема	Используется конденсатор	Установлены переключки	Значение включенной емкости, мкФ
	$C1, C2$	$XB1, XB2$	8
	$C2$	$XB2$	4
	$C1, C2$	$XB3$	2

тервалом времени между последовательными возвратами реле тока, а с помощью $KT2$ и $KL3$ — между последовательными срабатываниями. На диаграмме рис. 26,в поясняется очередность действия элементов устройства (времена срабатывания и возврата реле тока на диаграмме не учтены). Оба узла — $KT1, KL2$ и $KT2, KL3$ — выполняют одну и ту же функцию, и устройство могло бы содержать только один такой узел. Однако с целью повышения надежности несрабатывания устройства узлы дублированы. Контроль исправности дублированных узлов осуществлен с. помощью реле времени $KT4$, срабатывающего, если длительность несоответствия состояний $KT1$ и $KT2$ превышает его выдержку времени.

При изменении контролируемого тока реле $KT1$ и $KT2$ поочередно пускаются и возвращаются, при этом они контролируют времена между моментами срабатывания реле $KA1$ ($KT2$) и между моментами возврата реле $KL2$ ($KT1$).

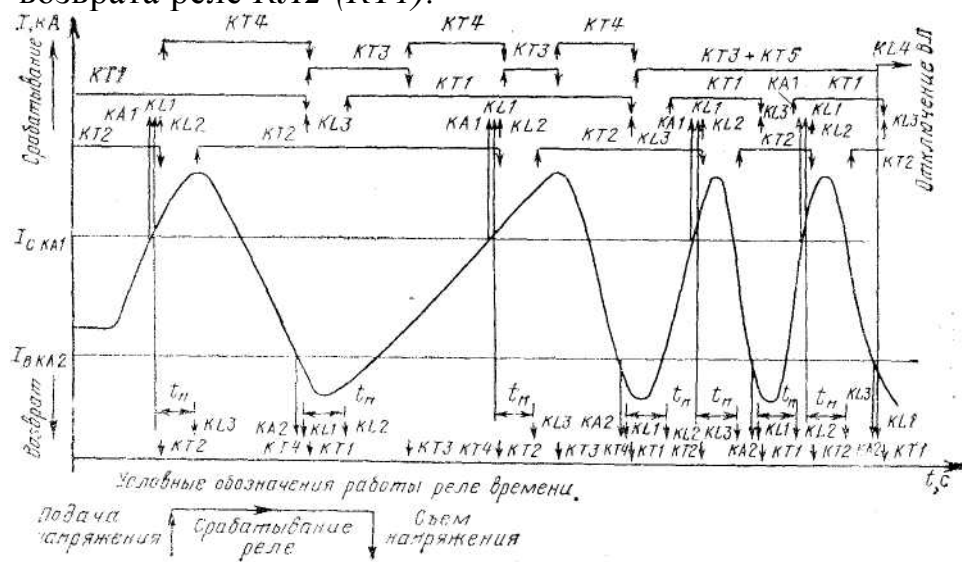


Рис. 26. Резервное устройство АЛАР:

а — цепи постоянного оперативного тока; б — цепи переменного тока; в — поясняющая диаграмма работы устройства

При срабатывании реле $KA1$ срабатывает реле-повторитель $KL1$ и своим размыкающим контактом $KL1.3$ снимает напряжение с катушек реле времени $KT2$ и вспомогательного реле $KL3$. Реле $KT2$ возвращается, замыкая контакт $KT2.1$ в цепи катушки реле $KT3$. Контакт $KL3.1$ замыкается через время, определяемое RC-цепью (время возврата $t_B \approx 0,054 \div 0,08$ с), и вновь пускает реле времени $KT2$, которое начинает отсчитывать заданное время.

При возврате реле $KA2$ возвращается реле $KL1$ и снимает напряжение с катушки реле времени $KT1$; реле $KT2$ при этом остается под напряжением, продолжая отсчитывать время.

Если к следующему срабатыванию реле $KA1$ реле $KT2$ успеет сработать, то оно разомкнет свой контакт в цепи реле $KT3$, которое сбросит набранное время. Если же реле $KT2$ не успеет сработать, то реле $KT3$ и $KT5$ продолжают отсчет времени и при наличии АР с малым периодом и длительностью, превышающей время срабатывания $KT3$ и $KT5$, замыкается контакт $KT5.1$ в цепи отключения выключателя с запретом ТАПВ. Цепь отключения (реле $KL4$) может контролироваться размыкающим контактом реле-повторителя токовых реле ($KL1/4$) с тем, чтобы отключение происходило при минимальных значениях тока АР.

Выходное реле $KL4$ остается в сработанном положении (после своего срабатывания) на время, определяемое приблизительно неравенством

$$t_{KT2} - 0,5T_{a,x} < t_{KL4} < t_{KT2},$$

где t_{KT2} — время срабатывания реле контроля длительности периода асинхронного хода.

Это время достаточно велико, что приводит к снижению надежности УРОВ не несрабатывание, поскольку на входе его схемы существует излишне долго сигнал и действие УРОВ зависит от поведения реле тока, контролирующего наличие тока в отключенной линии.

Помимо того, при передаче команды от устройства АЛАР на отключение ВЛ с противоположного конца с помощью команды К1 ВЧТО остальные команды ВЧТО ($K2—K5$) блокируются на время сработанного состояния выходного реле $KL4$. Поэтому, если в конкретных условиях эксплуатации указанные обстоятельства могут в условиях установившегося АР помешать правильному функционированию УРОВ, а также телепередаче команд $K2—K5$ ВЧТО, рекомендуется выполнить ограничение длительности отключающего импульса, например, путем включения реле с выдержкой времени на срабатывание (типа РП-251) параллельно реле $KL4$ и размыкающий контакт первого включить в цепь катушки $KL4$ либо, аналогично тому, как это сделано в I ступени основного устройства АЛАР, включить RC-контур в цепь перед реле $KL4$ и шунтирующим его резистором $R4$.

Использование контактов $KL2.2$ и $KL3.2$ предотвращает слишком кратковременные переключения реле $KL1$. Возможные при большом скольжении и срывающие бестоковую паузу реле $KT1$ и $KT2$. Изменение состояния реле $KL1$ возможно только после того, как надежно зафиксировано его предыдущее состояние.

Наличие перемычек в цепях обмотки и контактов реле тока $KA2$ позволяет при малом различии между расчетными значениями тока срабатывания $KA1$ и тока возврата $KA2$ исключить из схемы реле $KA2$.

Расчет параметров срабатывания. Выбору подлежат ток срабатывания устройства (грубого реле) $I_{с,у}$, ток возврата устройства (чувствительного реле) $I_{в,у}$, а также выдержки времени реле контроля периода, выходного и сигнального реле времени.

Исходными данными при выборе параметров срабатывания измерительных органов резервного устройства являются максимальные I_{max} и минимальные I_{min} значения тока за цикл асинхронного хода в группе рассматриваемых схем. Минимальные значения токов АР существенно зависят от соотношения между эквивалентными ЭДС. Если расчет проведен для $E_1/E_2=1$, то необходимо ввести коррекцию. Одной из возможных формул коррекции, учитывающей изменение ЭДС от 0,9 до 1,1, может быть следующая:

$$I_{min} = I_{min \text{ расч}} + 0,1 (I_{max} - I_{min \text{ расч}}) = 0,1 I_{max} + 0,9 I_{min \text{ расч}}, \quad (53)$$

где I_{max} , $I_{min \text{ расч}}$ — расчетные значения максимального и минимального токов из циклов асинхронного хода при $E_1/E_2=1$.

В простых случаях расчет тока АР может выполняться аналитически при представлении сопротивления элементов сети чисто индуктивным.

Поскольку возможен вариант применения резервного устройства с одним реле тока, в расчете определяются параметры срабатывания устройства и лишь после окончательного решения вопроса о количестве используемых реле выбираются параметры срабатывания каждого реле тока.

С учетом изложенного рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Ток возврата устройства $I_{в,у}$, являющийся током возврата КА2, определяется по условию отстройки от тока, минимального за цикл асинхронного хода:

$$I_{в,у} = k_n (I_{min})_{max}, \quad (54)$$

где R_n — коэффициент надежности (принимается равным 1,3— 1,5 в зависимости от точности расчетов); $(I_{min})_{max}$ — наибольшее из минимальных значений токов за цикл асинхронного хода, каждый из которых определен в одной из рассматриваемых схем с АР по контролируемому сечению.

2. Для каждой из рассматриваемых схем определяется действительный коэффициент надежности

$$k_{н,д} = I_{в,у} / I_{min}, \quad (55)$$

где I_{min} — минимальный за цикл асинхронного хода ток в данной схеме.

3. Определяется ток срабатывания устройства $I_{с,у}$, являющийся током срабатывания реле КА1:

$$I_{с,у} = I_{в,у} / k_{в,у}, \quad I_{с,у} = k_0 I_{в,у} / k_{в,р}, \quad (56)$$

где $R_{в,у}$ — коэффициент возврата устройства; $R_{в,р}$ — коэффициент возврата реле КА2 (в данном случае принимается равным 0,85);

$R_0 = I_{с,КА1} / I_{с,КА2}$ — коэффициент отстройки тока срабатывания грубого реле от тока срабатывания чувствительного реле (принимается минимальным, равным 1,1).

4. Проверяется коэффициент чувствительности устройства

$$k_{ч,у} = (I_{max})_{min} / I_{с,у}, \quad (57)$$

где $(I_{max})_{min}$ — наименьшее из максимальных значений токов за цикл асинхронного хода, каждое из которых определено в одной из рассматриваемых схем с АР по контролируемому сечению.

Для обеспечения срабатывания устройства при АР со скольжением до 10 Гц требуется $R_{ч,у} \geq 1,2$. В зависимости от точности расчетов необходимо обеспечить $R_{ч,у} = 1,3 \div 1,5$.

Если должное значение $R_{ч,у}$ не обеспечивается, то целесообразно рассмотреть вопрос о применении двух устройств, каждое для своей группы рассматриваемых схем сети.

Если получено излишне большое значение $R_{ч,у}$, то целесообразно увеличить R_0 по сравнению с принятым в п. 3: где $I_{с,у}$ — ток срабатывания устройства при $R_{ч,у} = 1,3 \div 1,5$.

$$k_0 = k_{в,р} I_{с,у} / I_{в,у}, \quad (58)$$

При $R_0 \leq 1,1$ ($R_{в,у} = R_{в,р} / R_0 \geq 0,85 / 1,1 = 0,77$) применяется устройство с одним реле тока. При настройке

устройства желательно иметь более низкое значение $R_{в,у}$ (за счет увеличения R_0), чтобы обеспечить лучшую отстройку от синхронных качаний, так как качания с амплитудой, не выходящей за пределы $I_{ска1}$ или $I_{в,у}$, не приводят к срабатыванию устройства. Это обстоятельство и обусловило установку двух реле тока. С другой стороны, желательно стремиться к увеличению $S_{отк}$. Оба эти требования приходят в противоречие, и в каждом конкретном случае требуется найти оптимальное решение

5. Для каждой из рассматриваемых схем сети определяется действительный коэффициент чувствительности реле, осуществляющего возврат пусковой части схемы (КА2, КЛ1) при снижении тока:

$$k_{ч,д} = k_0 I_{max} / I_{с,у} = I_{max} / I_{с\text{ КА2}}, \quad (59)$$

где k_0 принимается по пп. 3, 4.

6. По данным пп. 2 и 5 определяется скольжение отказа устройства $S_{отк}$. Для того, чтобы реле КЛ1 успевало возвращаться при уменьшении тока и устройство в целом фиксировало АР, в соответствии с экспериментальными зависимостями при заданном значении $R_{н,д}$ должно быть обеспечено:

значение $R_{ч,д}$ меньше своего граничного значения, при котором происходит отказ устройства,

$$k_{ч,д,отк} = 30 (k_{н,д} - 1) / S_{ож}; \quad (60)$$

значение скольжения отказа

$$S_{отк} = 30 (k_{н,д} - 1) / k_{ч,д} \quad (61)$$

больше, чем ожидаемое

скольжение $S_{ож}$, Гц (см. табл. 11).

Следует обратить внимание на то, что п. 4 требует ограничения $R_{ч}$ снизу, а п. 6 требует ограничения сверху. Эти два требования при большом скольжении тем труднее совместить, чем меньше значение $R_{н,д}$. Поэтому для повышения скольжения отказа необходимо переходить к большему значению $R_{н,д}$.

7. Определяется время срабатывания реле времени $KT1$ и $KT2$, контролирующих длительность периода асинхронного хода:

$$t_{KT1} = t_{KT2} - k_n T_{доп} - t_{п}, \quad (62)$$

где $R_n = 1,1 \div 1,2$ — коэффициент надежности; $T_{доп}$ — период допустимого скольжения в схеме сети, обуславливающей его максимальное значение, должно быть $T_{доп} \geq 3,5 t_{п}$; $t_{п}$ — время подготовки реле времени $KT1$ и $KT2$ к повторному срабатыванию, требуемое заводом-изготовителем (устанавливается при помощи РС-контура на реле $KL1$, $KL2$).

8. Время срабатывания устройства равно сумме времен срабатывания выходных реле времени $KT3$, $KT5$ ($t_{с,у} = t_{KT3} + t_{KT5}$) и определяется тремя условиями, перечисленными ниже:

а) условием отстройки от времени действия на отключение ВЛ основного устройства АЛАР, выявляющего АР в том же сечении, что и резервное устройство:

$$t'_{с,у} \geq t_{осн} + \Delta t_{сел}, \quad (63)$$

где $t_{осн}$ — время действия основного устройства АЛАР на отключение ВЛ; $t_{сел} = R_n T_{доп}$ — степень селективности, принимаемая пропорциональной $T_{доп}$, но не менее 1 с;

б) условием отстройки от цикла неуспешного АПВ на смежных линиях, сопровождающегося значительными колебаниями тока по контролируемой ВЛ:

$$t''_{с,у} \geq t_{КЗ} + t_{АПВ} + t_{КЗ,АПВ} + t_{кач}, \quad (64)$$

где $t_{КЗ}$ — максимальная длительность КЗ, отключаемого резервной защитой; $t_{АПВ}$ — время бестоковой паузы АПВ; $t_{КЗ,АПВ}$ —

длительность повторного КЗ при неуспешном АПВ (учитывается ускорение защиты после АПВ); $t_{\text{кач}} \approx 10T_{\text{доп}} \left(1 - \frac{1 - k_{\text{в,у}}}{k_{\text{ч,д}}}\right)$ — длительность

синхронных качаний с периодом менее времени срабатывания реле $KT1$ ($KT2$) при 10 циклах качаний; берется в схеме, обуславливающей его максимальное значение.

В эксплуатации $t_{\text{кач}}$ может корректироваться в соответствии с результатами наблюдений за качаниями в энергосистеме.

Если значение $(t_{\text{кз}} - t_{\text{АПВ}})$ превышает значение $R_H T_{\text{доп}}$, то в (64) подставляется $R_H T_{\text{доп}}$:

в) условием согласования с временем действия резервных устройств АЛАР, установленных на соседних ВЛ, если рассматриваемое устройство приходит в действие при АР по смежному сечению ($k_{\text{ч,вн}} = I_{\text{max вн}} / I_{\text{с,у}} \geq 0,9$):

$$t'_{\text{с,у}} \geq t_{\text{см}} + \Delta t_{\text{сел}} \quad (65)$$

где $\Delta t_{\text{сел}}$ берется по п. «а»; $t_{\text{см}}$ — время действия резервного устройства АЛАР, установленного на смежной ВЛ; I_{max} — максимальный ток по контролируемой ВЛ при внешнем АР.

9. Определяется время срабатывания реле времени, контролирующего исправное состояние устройства: $t_c \approx 4t_{\text{кТ1}}$.

Пример расчета резервного устройства Расчет устройства выполнен для конкретного объекта с использованием результатов расчета изменения тока по линии при АР в расчетных схемах сети 1 и 2.

Ход расчета в соответствии с приведенными рекомендациями приводится ниже, а его результаты сведены в табл. 20.

а) Ток возврата устройства

$$I_{\text{в,у}} = k_{\text{н}} (I_{\text{min}})_{\text{max}} = 1,5 \cdot 1,18 = 1,77 \text{ кА},$$

где $I_{\text{в,у}} = 1,5$ — коэффициент надежности; $(I_{\text{min}})_{\text{max}} = 0,1 \times 2,8 + 0,9 \cdot 1,0 = 1,18 \text{ кА}$ — наибольшее значение из минимальных за цикл асинхронного хода токов с учетом (53).

б) Действительный коэффициент надежности для каждой расчетной схемы

$$k'_{\text{н,д}} = I_{\text{в,у}} / I'_{\text{min}} = 1,77 / 0,8 = 2,2; \quad k''_{\text{н,д}} = 1,77 / 1,0 = 1,77.$$

в) Ток срабатывания устройства

$$I_{\text{с,у}} = k_0 I_{\text{в,у}} / k_{\text{в,р}} = 1,1 \cdot 1,77 / 0,85 = 2,28 \text{ кА},$$

где $R_0 = 1,1$ — минимальный коэффициент отстройки, который необходимо обеспечить

г) Коэффициент чувствительности устройства

$$k_{\text{ч,у}} = (I_{\text{max}})_{\text{min}} / I_{\text{с,у}} = 2,7 / 2,28 = 1,2,$$

где $(I_{\text{max}})_{\text{min}} = 2,7 \text{ кА}$ — наименьшее значение из максимальных токов за цикл асинхронного хода.

д) Действительный коэффициент чувствительности реле для каждой из двух расчетных схем:

$$k'_{\text{ч,д}} = k_0 I_{\text{max}} / I_{\text{с,у}} = 1,1 \cdot 2,7 / 2,28 = 1,3; \quad k''_{\text{ч,д}} = 1,1 \cdot 2,8 / 2,28 = 1,35.$$

$$k''_{\text{ч,д}} = 1,1 \cdot 2,8 / 2,28 = 1,35.$$

е) Скольжение отказа устройства для каждой расчетной схемы по данным пп. «б»,

«д»:

$$s'_{\text{отк}} = 30 (k_{\text{н,д}} - 1) / k_{\text{ч,д}} = 30 (2,2 - 1) / 1,3 > 10 \text{ Гц};$$

$$s''_{\text{отк}} = 30 (1,77 - 1) / 1,35 > 10 \text{ Гц}.$$

Таблица 20. Результаты расчета параметров срабатывания резервного устройства АЛАР

Схема сети	Ток АР			$s_{ож}, Гц$	Параметры устройства		
	$I_{max}, кА$	$I_{min}, кА$	I_{min} при $k=1,1/0,9, кА$		$I_{в, у}, кА$	$I_{с, у}, кА$	$k_{в, р}$
1	2,7	0,8	0,99	0,6	1,77	2,28	0,85
2	2,8	1	1,18	0,6	1,77	2,28	0,85

Продолжение табл. 20

Схема сети	Параметры устройства			$k_{н, л}$	$k_{ч, у}$	$k_{ч, д}$	$s_{отк}, Гц$
	$t_{KT1} = t_{KT2}, с$	$t_{KT3} + t_{KT5}, с$	$t_{KT4}, с$				
1	5	40	20	2,2	1,2	1,3	>10
2	5	40	20	1,77	1,2	1,35	>10

Примечание. Время действия $t_{с, у}$ определяется независимо от времени действия других устройств АЛАР.

Полученное значение $s_{отк}$ сравнивается с ожидаемым скольжением, которое было рассчитано в соответствии с методикой его определения (см. табл. 11) и оказалось равным 0,6 Гц. Так как расчетные значения $s_{отк}$ больше ожидаемого, то делается вывод о работоспособности резервного устройства в установившемся режиме АР

$$(k_{ч, д} < k'_{ч, д, отк} = 30(2,2 - 1)/0,6 > 10, \\ k''_{ч, д, отк} = 30(1,77 - 1)/0,6 > 10).$$

ж)Время срабатывания реле времени $KT1$ и $KT2$, контролирующих длительность периода асинхронного хода:

$$t_1 = k_n T_{доп} - t_n = 1,1 \cdot 4,75 - 0,1 = 5,1 с,$$

где $k_n = 1,1$ — коэффициент надежности; $T_{доп} = 4,75 с$ — период допустимого скольжения в схеме, обуславливающей его максимальное значение.

з) Время срабатывания выходных реле времени $KT3$ и $KT5$ устройства по трем условиям:

1)по условию отстройки от времени действия основного устройства АЛАР:

$$t'_{с, у} > t_{осн} + \Delta t_{сел} \approx 2,4 + 1,1 \cdot 4,75 = 8 с,$$

где $t_{осн} \approx 2,4 с$ — время действия основного устройства АЛАР (I степень);

2) $\Delta t_{сел} = k_n T_{доп} = 1,1 \cdot 4,75 = 5,2 с$ — степень селективности;

по условию отстройки от цикла неуспешного АПВ на смежных линиях, сопровождающегося значительными колебаниями тока на данной линии:

$$t''_{с, у} \geq t_{КЗ} + t_{АПВ} + t_{КЗ, АПВ} + t_{кач} = 0,1 + 1,05 + 0,1 + 42 = 43 с,$$

где $t_{кз} = 0,1$ с — максимальная длительность КЗ, отключаемого резервной защитой; $t_{апв} = 1,05$ с — время бестоковой паузы ускоренного ТАПВ, $t_{кз,АПВ} = 0,1$ с — длительность повторного КЗ (неуспешное АПВ), отключаемого ускоренной защитой;
 $t_{кач} = 10T_{доп}(1 - (1 - R_{в,у}) / R_{ч,д}) = 10 \cdot 4,75(1 - (1 - 0,83) / 1,5) = 42$ с — длительность синхронных качаний (10 циклов) с периодом менее времени срабатывания реле $KT1$ ($KT2$),

3) по условию согласования с временем действия резервных устройств АЛАР, установленных на соседних ВЛ: на смежных линиях не запроектирована установка резервных устройств, поэтому для данного устройства АЛАР такая отстройка не требуется.

Ориентировочно принимается $t_{сy} = t_{кт3} + t_{кт5} = 40$ с по условию отстройки от синхронных качаний

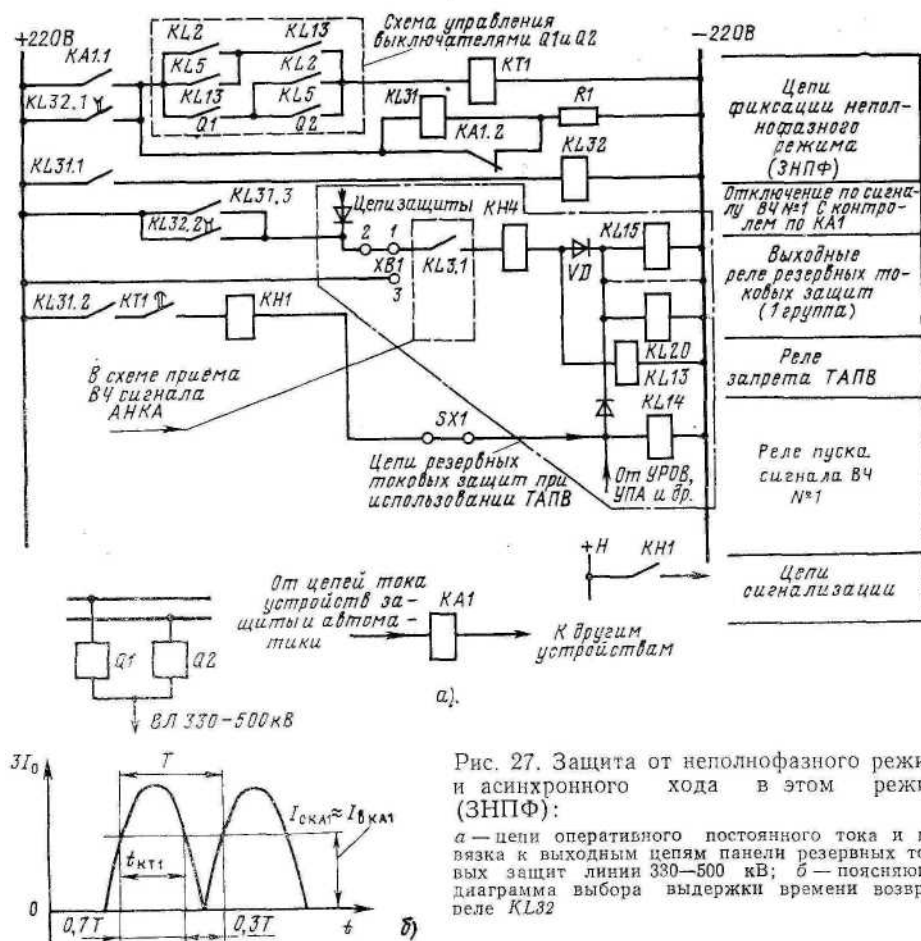
и) Время срабатывания реле времени контроля исправности: $t_{скт4} \approx 4 \times 5 = 20$ с

Защита от неполно-фазного режима и асинхронною хода в этом режиме предназначена для ликвидации АР в неполно-фазном режиме, так как основное и резервное устройства АЛАР могут отказать из-за наличия продольной несимметрии, а устройства релейной защиты — из-за наличия периодических колебаний, тока и напряжения. Защита действует также и при неполно-фазном режиме без АР

Асинхронный режим в неполно-фазном режиме может возникнуть при нарушении устойчивости по электропередаче при ее работе на одном из участков одной или двумя фазами В этом случае он будет ликвидирован вероятнее всего защитой от неполно-фазного режима, входящей в устройство (панель) резервной токовой защиты от КЗ на землю

Однако такая ситуация скорее всего является следствием возникновения АР в полно-фазном режиме и ею неполно-фазного отключения устройствами АЛАР В этом случае указанная выше защита, действующая с выдержкой времени, может отказать из-за периодических снижений контролируемого ею тока $3I_0$.

С целью исключения подобноу отказа в 1974 г в институте «Энергосетьпроект» была разработана типовая схема защиты от неполно-фазного режима, действующая также при качаниях (АР) и обозначаемая аббревиатурой ЗНПФ Ниже рассмотрена ее принципиальная схема (рис 27,а), скорректированная одним из возможных способов с учетом особенностей нового исполнения принципиальной схемы резервных токовых защит 530- 500 кВ при использовании ОАПВ, ТАПВ и УТАПВ (разработка института «Энергосетьпроект») Схема ЗНПФ выполнена почти так же, как IV ступень типовой резервной защиты от КЗ на землю, па принципе фиксации превышения током нулевой последовательности заданной величины (уставки) в течение заданного времени В качестве пускового органа использовано реле тока KAI , реагирующее па ток пулевой последовательности, а в качестве выявительного органа — совокупность контактов, обеспечивающая контроль



отключенного состояния одного из двух линейных выключателей $Q1$ или $Q2$ и недовключение (недоотключение) второго выключателя $КВЗ$ — контакт реле фиксации отключения трех фаз выключателя в схеме управления выключателем, замкнутый при отключенном выключателе; $KL2$, $KL5$ — контакты выходных реле защиты от непереключения фаз в схемах управления выключателями соответственно в цепях электромагнитов отключения № 1 и 2. Перечень элементов устройства приведен в табл. 21.

В отличие от защиты устройство ЗНПФ имеет дополнительное реле $KL32$, несколько задерживающее возврат реле времени $KT1$ при возврате реле тока $KA1$ и обеспечивающее тем самым действие устройства независимо от наличия качаний (АР).

Параметры срабатывания реле тока $KA1$ и реле времени $KT1$ принимаются такими же, как соответствующие параметры IV ступени резервной токовой защиты от КЗ на землю. Выдержка времени реле $KT1$ предусматривается

Таблица 21. Перечень элементов

Обозначение элемента	Наименование	Тип	Техническая характеристика	Количество
<i>KA1</i>	Реле тока	РТ-40, Р-1	—	1
<i>KT1</i>	Реле времени	РВ-01	0,1—1,0 с; $U_{ном} = 220 В$	1
<i>KL31</i>	Реле промежуточное	РП-23	$U_{ном} = 110 В$	1
<i>KL32</i>	То же	РП-252	$U_{ном} = 220 В$	1
<i>KHI</i>	Реле указательное	РУ-21, 0	—	1
<i>RI</i>	Резистор	ПЭ-25	2,4 кОм $\pm 10\%$	1
<i>SX1</i>	Накладка	НКР-3	—	1

для того, чтобы в случае отключения ВЛ защитой от непереключения фаз выключателя не успел выработаться также сигнал на отключение выключателя противоположного конца (путем останова ВЧ-передатчика диффазной защиты линии или с помощью аппаратуры телепередачи аварийных команд АНКА). Поэтому выдержка времени реле *KT1* должна превышать время отключения выключателя плюс время возврата пусковых органов защиты и составляет обычно не более 0,3 с.

Устройство ЗНПФ обеспечивает выработку команды на отключение ВЛ с обеих сторон по цепи контактов *KL31.2* и *KT1* через заданную выдержку времени t_{KT1} при неполнофазном режиме без АР и через несколько большую выдержку времени при АР (на величину от нуля до времени, в течение которого раде тока находится в состоянии несрабатывания в цикле асинхронного хода). Время возврата промежуточного реле *KL32* (t_{KL32}) должно превышать время состояния несрабатывания реле *KA1* в цикле асинхронного хода $t_{KA1} \approx 0,3T_{a,x}$ (рис. 27,6). Следовательно, расчетным режимом для определения этого времени является случай, когда $t_{KT1} = 0,7T_{a,x}$. Поэтому должно быть выполнено условие $t_{KL32} > 0,3t_{KT1}/0,7$, что составляет 0,15—0,2 с.

Передача команды ЗНПФ на противоположный конец ВЛ для ее отключения осуществляется, как правило, с помощью ВЧ-устройства типа АНКА через выходные цепи, например панели резервных токовых защит (см. рис. 27,а). На приемном конце команда может контролироваться (подтверждаться) срабатыванием пускового органа своего комплекта ЗНПФ (перемычка *XB1* в положении 1-2). Если команда придет в момент, когда реле *KA1* находится в сработавшем состоянии, то отключение произойдет через контакт *KL31.3* реле-повторителя *KA1* и через контакт *KL33.1* исполнительного реле сигнала № 1 приемника АНКА.

Если команда придет в момент нахождения реле *KA1* в состоянии несрабатывания, то цепь отключения будет образована с помощью реле *KL32* (контакт *KL32.2*), имеющего задержку на возврат и сработавшего при предыдущем срабатывании реле *KA1*.

В схеме резервных токовых защит предусмотрено исключение контроля сигнала № 1, для чего перемычка *XB1* переключается в положение 1-3 (см. рис. 27,а). В этом случае отключение ВЛ с противоположной стороны произойдет при приеме сигнала № 1.

В условиях, когда требуется работа одиночной ВЛ в неполно-фазном режиме и ее отключение допустимо лишь при АР, а также при длительном отсутствии средств передачи сигнала на отключение линии с другого конца и повышенной вероятности АР в неполнофазном режиме, целесообразно оборудовать ВЛ так называемым дополнительным устройством АЛАР. В качестве последнего может использоваться панель резервного устройства АЛАР, включаемая в этом случае на ток нулевой последовательности. Недостатком такого решения является низкая селективность автоматики, поскольку она может обеспечиваться лишь отстройкой от тока нулевой последовательности при неполнофазной работе соседнего участка линии и времени согласования с действием подобных устройств, установленных на соседних участках линии.

- 1) максимальная длительность КЗ, отключаемого резервной защитой;
- 2) длительность бестоковой паузы АПВ;
- 3) длительность повторного КЗ, возникающего при неуспешном АПВ (учитывается ускорение релейной защиты после АПВ);
- 4) выдержка времени контроля периода асинхронного хода, устанавливаемая в данном комплекте АЛАР;
- 5) степень селективности, определяемая условием согласования с временем действия аналогичных устройств АЛАР на соседних ВЛ или принимаемая равной выдержке времени по п. 4 при отсутствии согласования, но не менее 1 с.

Как указывалось выше, на межсистемных транзитах с промежуточными подстанциями целесообразно в асинхронном режиме производить избирательное деление так, чтобы нагрузка промежуточных подстанций осталась подключенной к энергосистеме,, имеющей избыток мощности, т. е. при АР, вызванном дефицитом мощности, например, в ЭЭС1 (рис. 28), питание промежуточных

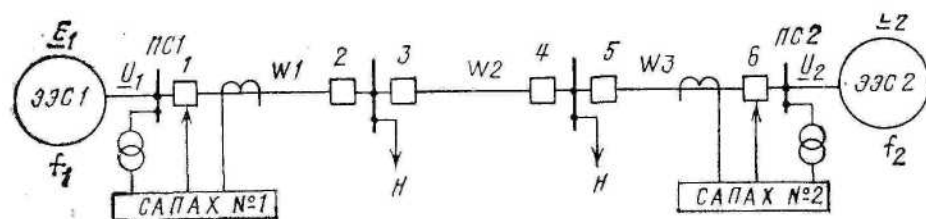


Рис. 28. Схема электропередачи:
 E_1, f_1 — ЭДС и частота первой электрической системы; E_2, f_2 — ЭДС и частота второй электрической системы; U_1, U_2 — напряжение на шинах подстанций ПС1 и ПС2; W_1, W_2, W_3 — линии электропередачи; H — питающие нагрузки промежуточных подстанций

Одним из устройств, предназначенных для ликвидации АР путем такого оптимального деления, является устройство, разработанное в ОДУ Северо-Запада и получившее наименование САПАХ — селективная автоматика прекращения асинхронного хода.

Рассмотрим действие этой автоматики. На электропередаче, связывающей ЭЭС1 и ЭЭС2, устанавливаются два таких устройства: на подстанции ПС1 (со стороны ЭЭС1) устанавливается САПАХ № 1, на подстанции ПС2 (со стороны ЭЭС2) — САПАХ № 2. Если АР явился следствием дефицита активной мощности в ЭЭС1, должен сработать САПАХ № 1, отделяя электропередачу от ЭЭС1 и переводя промежуточные подстанции на питание от ЭЭС2; САПАХ № 2 при этом не действует. Если АР вызван дефицитом мощности в ЭЭС2, срабатывает САПАХ № 2, промежуточные подстанции

переводятся на питание от ЭЭС1, САПАХ № 1 не действует.

Для фиксации возникновения и определения характера асинхронного режима в схеме устройства САПАХ (первой его модификации) [17] применены два пусковых органа: реле, реагирующее на изменение угла между векторами напряжений на шинах подстанций ПС1 и ПС2, где установлены устройства САПАХ № 1 и САПАХ № 2, и реле направления активной мощности. Следует подчеркнуть, что электрический центр качаний во всех режимах находится между подстанциями ПС1 и ПС2, т. е. не выходит за пределы рассматриваемой электропередачи.

Увеличение угла сверх определенного значения ($\delta_{кр}$) свидетельствует о возникновении АР (уставка реле должна соответствовать углу между векторами напряжений порядка 100—120°). Взаимодействие реле угла с реле направления мощности (РНМ) обеспечивает селективное действие устройств САПАХ № 1 и САПАХ № 2, т. е. обеспечивает деление в соответствующих точках. Достигается это следующим образом. При возникновении АР изменяется угол между векторами ЭДС энергосистем и, следовательно, между векторами напряжений на шинах подстанций ПС1

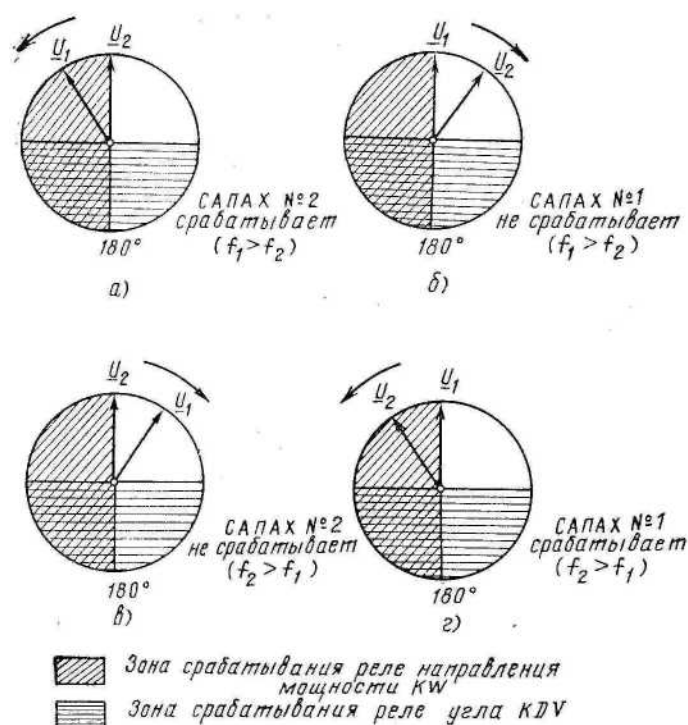


Рис. 29. Диаграммы, поясняющие принцип действия первой модификации устройства САПАХ

и ПС2, на который реагирует реле угла. Одновременно при угле, близком к 180° (рис. 29), происходит изменение знака мощности, что вызывает периодическое срабатывание и возврат реле направления мощности, в качестве которых используются реле с углом максимальной чувствительности, равным —30° (вектор тока опережает вектор напряжения). Указанные реле включаются на напряжение и ток, сочетание которых обеспечивает измерение активной мощности (например, междуфазное напряжение U_{AC} и ток I_A). Реле ориентируются таким образом, чтобы их срабатывание (замыкание контакта) происходило при направлении мощности к шинам соответствующих подстанций. Взаимодействие реле угла и реле направления мощности выполняется в схеме устройства САПАХ так, чтобы разрешалось действие

автоматики только в том случае, если реле направления мощности срабатывает раньше реле угла.

Рассмотрим работу устройства САПАХ на подстанциях $ПС1$ и $ПС2$, например, при АР, возникшем при дефиците мощности в $ЭЭС2$ ($f_1 > f_2$). Вектор напряжения на шинах подстанции, на которой установлено рассматриваемое устройство САПАХ, принимается неподвижным, т. е. $\underline{U}_2$ на шинах $ПС2$ и $\underline{U}_1$ на шинах $ПС1$.

Соответственно $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ — векторы напряжений, моделируемые на $ПС2$ и $ПС1$ и вращающиеся относительно неподвижных векторов.

При дефиците мощности в $ЭЭС2$ вектор напряжения $\underline{U}_1$ при АР будет идти с опережением, т. е. на $ПС2$ будет вращаться относительно вектора $\underline{U}_2$ против часовой стрелки. На $ПС1$ в этом случае (при дефиците в $ЭЭС2$) вектор $\underline{U}_2$ будет отставать от вектора $\underline{U}_1$ т. е. будет вращаться относительно него по часовой стрелке. Как видно из диаграммы рис. 29,а, на $ПС2$ РНМ срабатывает раньше (или было в сработавшем состоянии в исходном режиме) а реле угла — позднее, при достижении углом δ значения $90—100^\circ$ Устройство САПАХ № 2 срабатывает, промежуточные подстанции переводятся на питание от $ЭЭС1$. На подстанции $ПС1$ устройство САПАХ № 1 не действует, поскольку реле угла срабатывает раньше, чем РНМ (рис. 29,б).

В условиях АР при дефиците мощности в $ЭЭС1$ ($f_2 > f_1$) вектор напряжения $\underline{U}_1$ будет идти с отставанием по отношению к вектору $\underline{U}_2$ т. е. на $ПС2$ будет вращаться по часовой стрелке и, следовательно, устройство САПАХ № 2 срабатывать не будет (рис. 29,в). Сработает устройство САПАХ № 1 на $ПС1$, где вектор $\underline{U}_2$ вращается против часовой стрелки относительно вектора $\underline{U}_1$ и где срабатывание РНМ происходит раньше, чем срабатывание реле угла (рис. 29,г).

Схема устройства САПАХ, обеспечивающая рассмотренное взаимодействие реле угла и РНМ, приведена на рис. 30.

Если замыкание контакта реле направления мощности KW предшествует срабатыванию реле угла KDV , срабатывает промежуточное реле $KL1$ и самоудерживается через контакт $KL1.1$. Контакт $KL1.2$ подготавливает цепь реле $KL2$, которое срабатывает и производит деление, как только работает реле угла KDV .

Если замыкание контакта реле мощности KW происходит после срабатывания реле угла KDV , автоматика действовать не будет поскольку цепь реле $KL2$ оказывается разомкнутой поочередно либо на контакте $KL1.2$, либо на контакте реле KDV .

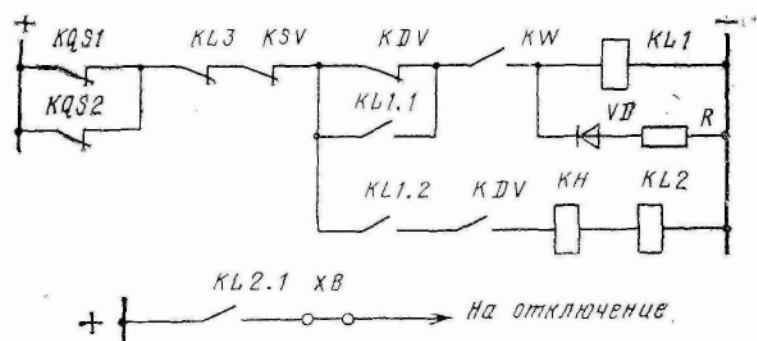


Рис. 30. Схема оперативных цепей устройства САПАХ первой модификации

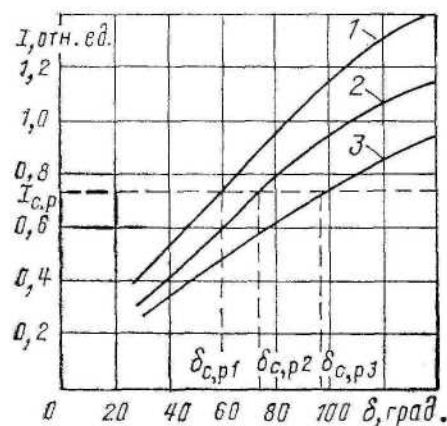


Рис. 31. Пример зависимости $I(\delta)$ для электропередачи 500 кВ

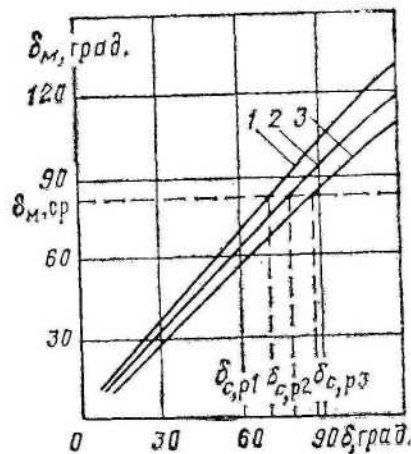


Рис. 32. Пример зависимости $\delta_m(\delta)$ для АЛАР, выполненной с использованием фантомной схемы, для электропередачи 500 кВ

Для предотвращения неправильного действия автоматики при неисправности трансформатора напряжения или его цепей, а также при наличии несимметрии в сети в схему автоматики введены контакты соответствующих блокировок: контакт KSV —блокировки при нарушении цепей напряжения; контакты $KQS1$, $KQS2$ — блокировки при снятии напряжения, подаваемого на схему автоматики контактами реле-повторителей разъединителей; контакт $KL3$ — блокировки при несимметричных КЗ или в неполнофазных режимах (используется контакт реле, реагирующего на появление составляющих обратной и нулевой последовательностей).

Действие схемы обеспечивается (с учетом времени срабатывания входящих в нее реле) при периодах АР больше 0,3 с.

Трудность непосредственного измерения угла δ с помощью средств телепередачи фазы заставляет, как правило, использовать аналоги угла, среди которых наиболее просто реализуемым является ток I электропередачи [19].

На рис. 31 представлена зависимость тока I от угла δ для конкретной двухцепной электропередачи. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют определенному режиму электропередачи (нормальный, отключена одна цепь на одном или двух участках). Недостатком этого способа является большой разброс значений угла срабатывания ($\delta_{с,р1}$, $\delta_{с,р2}$, $\delta_{с,р3}$) при принятой уставке по току $I_{с,р}$, показанной пунктирной линией.

Другой способ (о чем говорилось выше) — использование фантомной схемы (моделирование вектора напряжения удаленной точки, например, приемного конца электропередачи). Схема позволяет получить в месте установки автоматики, например в начале электропередачи, некоторый вектор напряжения, который при

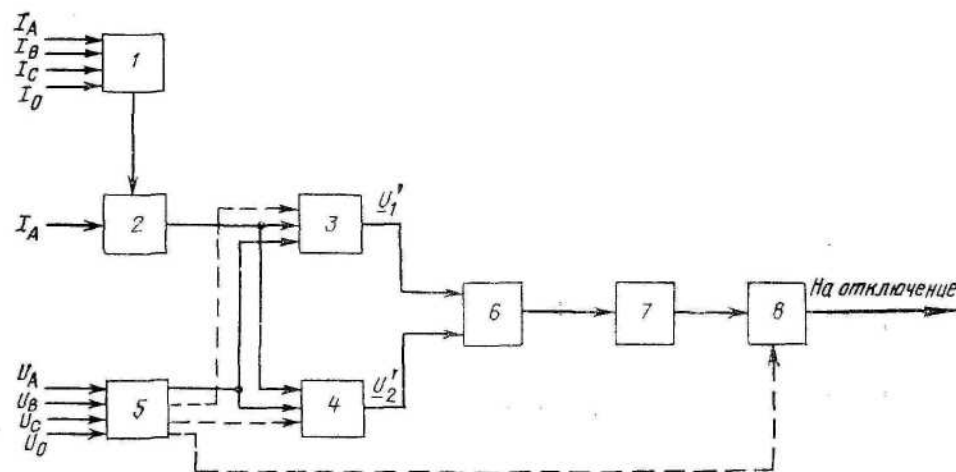


Рис. 33. Функциональная структурная схема устройства САПАХ, реагирующего на расхождение угла между векторами эквивалентных ЭДС:

1, 2 — блок блокировки и его исполнительный орган; 3 — блок моделирования вектора напряжения $\underline{U}_1'$; 4 — блок моделирования вектора напряжения $\underline{U}_2'$; 5 — блок диагностики; 6 — блок угла; 7 — выходной блок; 8 — устройство блокировки САПАХ в режиме его проверки

полном подобии между натурой и ее моделью совпадает с вектором напряжения приемного конца, а при отсутствии такого подобия (при изменении схемы электропередачи) отличается на некоторый угол δ_m , характеризующий погрешность измерения.

На рис. 32 дана зависимость δ_m (δ) для той же двухцепной электропередачи и для тех же режимов. Фантомная схема дает существенно меньший разброс значений угла срабатывания по сравнению с использованием в качестве аналога тока электропередачи. Здесь δ_m , ср, показанное пунктиром, — значение угла моделирования для принятых усредненных параметров модели, дающих наименьший разброс точек срабатывания автоматики при изменении условий работы (схемы) электропередачи. Автоматика с фантомной схемой считается более совершенной и используется в энергосистемах, в том числе в устройствах САПАХ.

Следует специально подчеркнуть то обстоятельство, что устройства "САПАХ № 1 и САПАХ № 2" на подстанциях ПС1 и ПС2 (см. рис. 28) не резервируют друг друга. Это означает, что при отказе устройства или при отказе выключателя АР не будет ликвидирован, если не предусмотреть дополнительного резервного делительного устройства, пусть даже действующего неселективно. Отметим также, что при отказе выключателя может не подействовать УРОВ, если имел место АР с небольшим периодом. Указанное является существенным недостатком рассмотренной (первой) модификации устройства САПАХ.

Опыт эксплуатации выявил и другие недостатки этой модификации устройства, в частности недостатки реле, реагирующего на изменение угла между векторами напряжений, а именно: из-за низкого коэффициента возврата этого реле (около 0,6—0,8) при работе линии близко к пределу статической устойчивости может происходить излишнее срабатывание устройства в момент ликвидации КЗ в примыкающей сети и, кроме того, реле может ложно срабатывать при обрыве цепей трансформатора напряжения.

Все эти недостатки потребовали разработки новых модификаций устройства САПАХ [9, 18].

Усовершенствованное устройство, выполненное на полупроводниковых приборах, основано на определении взаимного угла между векторами эквивалентных ЭДС E_1 и E_2 электрических систем ЭЭС1 и ЭЭС2 (см. рис. 28), а также их частоты. Указанное достигается путем моделирования векторов напряжений в расчетных точках сети первой электрической системы U_1' и второй электрической системы LV. Следует еще раз подчеркнуть, что для надежной работы устройства

САПАХ необходимо, чтобы электрический центр качаний находился в пределах электропередачи, т. е. моделируемые векторы напряжений должны находиться по обе стороны от ЭЦК во всех расчетных режимах.

Функциональная структурная схема усовершенствованного устройства САПАХ приведена на рис. 33.

Для моделирования векторов напряжений используется фазное напряжение в месте установки САПАХ (например, U_A), компенсированное падением напряжения от фазного тока I_A на сопротивлениях компенсации Z_{k1} и Z_{k2} в обе стороны от места установки устройства до расчетных точек сети, соответственно в сторону ЭЭС1 и в сторону ЭЭС2. Таким образом, вектор $U1$ моделируется блоком 3 согласно выражению

$$\underline{U}'_1 = \underline{U}_A + \underline{I}_A \underline{Z}_{k1},$$

вектор $U2$ моделируется блоком 4 согласно выражению

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_{k2}.$$

Рассматриваемая модификация устройства САПАХ, в отличие от предыдущей по схеме рис. 30, обладает свойством резервирования, т. е. устройство может срабатывать в зоне основного или резервного действия.

Если АР явился следствием дефицита активной мощности в ЭЭС1 ($f_2 > f_1$), САПАХ № 1 срабатывает в зоне основного действия, САПАХ №2 — в зоне резервного действия (при отказе САПАХ № 1 или выключателя 1 на рис. 28). Если же АР — следствие дефицита активной мощности в ЭЭС2 ($f_2 > f_1$), то, наоборот: САПАХ № 2 срабатывает в зоне основного действия, САПАХ № 1 — в зоне резервного (при отказе САПАХ № 2 или выключателя 6).

При сравнении моделируемых напряжений $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2'$ определяется совпадение по времени положительных полуволн синусоид,

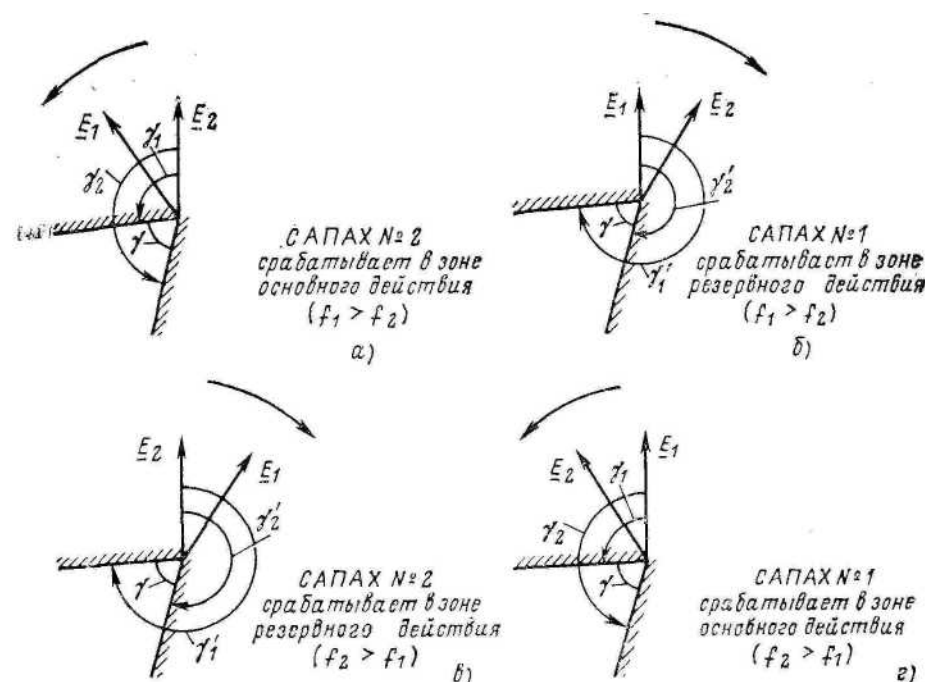


Рис. 34. Диаграммы, поясняющие работу усовершенствованного устройства САПAX в зоне основного и резервного действия:

а, б — зоны действия соответственно для САПAX № 2 и САПAX № 1 при дефиците мощности в ЭЭС2 ($f_1 > f_2$); в, г — зоны действия соответственно для САПAX № 2 и САПAX № 1 при дефиците мощности в ЭЭС1 ($f_2 > f_1$)

поскольку время их совпадения пропорционально углу между векторами эквивалентных ЭДС E_1 и E_2 . Осуществляется такое сравнение блоком угла б, использующим для этой цели заряд конденсатора, причем схема выполнена таким образом, что ток в цепи заряда конденсатора протекает только в течение времени совпадения положительных полуволн синусоид напряжений. Регулируя значение сопротивления резистора в цепи заряда конденсатора, можно изменять угол срабатывания устройства. Таким образом, циклически повторяя процесс сравнения, блок угла формирует на выходе импульсы, соответствующие углу, обеспечивая срабатывание или несрабатывание устройства САПAX в зоне основного или резервного действия.

На рис. 34 приведены векторные диаграммы, поясняющие работу устройства САПAX в зоне основного и резервного действия. Углы γ_1 и γ_2 являются соответственно углами срабатывания и возврата устройства САПAX при его действии в основной зоне, углы γ_1' и γ_2' — то же при действии в резервной зоне. Значения углов γ_1 и γ_2 , как правило, укладываются в пределы $90—180^\circ$ (зона основного действия), а углов γ_1' и γ_2' — в пределы $180—270^\circ$ (зона резервного действия).

Практически при выборе уставки для устройства САПAX исходят из значения угла γ_1 в пределах $100—120^\circ$, имея в виду преимущественную работу устройства в зоне основного действия. В отдельных случаях для ответственных потребителей, подключенных вблизи ЭЦК, угол γ_1 может быть взят меньше 100° .

Угол срабатывания в резервной зоне γ_2' выбирается, исходя из требования не превышения допустимого (предельного) значения разности частот ЭЭС1 и ЭЭС2. Следует иметь в виду, что при превышении некоторого граничного значения разности частот теряется взаимная селективность устройств, установленных по концам электропередачи.

Как было сказано выше, блок угла б (рис. 33) формирует на выходе импульсы, соответствующие углу между векторами эквивалентных ЭДС. Эти импульсы поступают на выходной блок 7, который формирует непрерывный

выходной сигнал, обеспечивая при срабатывании устройства САПАХ надежное действие на отключение выключателя. Для увеличения селективности сигнал на выходе блока 7 формируется только в том случае, если на его входе появляется повторный импульс от блока угла 6 (через 20 или 10 мс соответственно при однополупериодном или двухполупериодном исполнении устройства).

Фазный ток I_A к блокам моделирования 3 и 4 подключается через исполнительный орган 2 блока блокировки, обеспечивающий автоматическое отключение фазного тока от входов блоков моделирования при расчетных видах КЗ. Время исключения тока после возникновения КЗ не превышает 20 мс, что вполне обеспечивает несрабатывание устройства САПАХ при КЗ.

Фазное напряжение для моделирования векторов напряжений подключается через блок диагностики 5. В нормальном рабочем режиме САПАХ напряжение U_A подключается через блок 5 непосредственно от трансформатора напряжения. В режиме диагностики через блок 5 к блокам моделирования 3 и 4 подключаются два искусственных напряжения, которые позволяют проверить работу устройства в режиме срабатывания в зоне основного или резервного действия, а также в режиме, когда устройство не должно срабатывать.

Например, если требуется проверить, соответствует ли угол срабатывания заданным уставкам в зоне основного или резервного действия, к блокам моделирования подключаются напряжения, угол между которыми примерно на 5° больше или меньше граничного угла. В первом случае САПАХ должен срабатывать, во втором — не должен.

Блоком диагностики 5 в режиме диагностического контроля блокируется цепь па отключение выключателя. Срабатывание или несрабатывание устройства САПАХ фиксируется действием выходного реле. Важно отметить, что диагностический контроль, осуществляемый периодически эксплуатационным персоналом, позволяет примерно за один час определить работоспособность

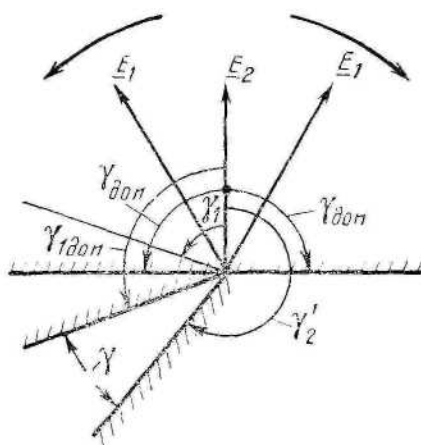


Рис. 35. Диаграмма, поясняющая работу двухступенчатого устройства САПАХ:

γ_1 — уставка первой ступени (действия, направленные на предотвращение АР); γ_{don} — уставка срабатывания дополнительного блока угла (перестройка устройства с I ступени на II); γ_{1don} — уставка II ступени (действие на деление электропередачи); γ — область работы устройства на деление; γ_2 — работа устройства на деление при действии в резервной зоне

устройства и правильность уставок и не требует подключения каких-либо внешних цепей и приборов.

Время срабатывания устройства САПАХ составляет не более 60 мс для однополупериодного исполнения и не более 30 мс для двухполупериодного исполнения.

Дальнейшая работа по усовершенствованию устройства САПАХ привела к созданию многофункционального устройства, позволяющего не только ликвидировать уже возникший АР, но и предотвращать его возникновение [18]. Это устройство содержит две ступени воздействий: I ступень призвана предотвратить нарушение устойчивости, для чего при ее срабатывании производится (с помощью средств телепередачи сигналов) отключение генерирующей мощности со стороны избыточной системы и пуск резервной мощности (а возможно, и отключение нагрузки) со стороны

дефицитной системы. Если указанные воздействия опоздали или оказались недостаточными и предотвратить АР не удалось, срабатывает II ступень устройства, которая производит деление межсистемной электропередачи в оптимальном с точки зрения баланса мощностей месте.

Осуществляется такое двухступенчатое действие устройства САПАХ с помощью специально разработанного дополнительного блока угла, который действует в сочетании с основным блоком угла. Границей срабатывания дополнительного блока являются углы $\pm 90^\circ$, т. е. он действует при прохождении вектором ЭДС E_I угла 90° независимо от направления вращения вектора — против, (при $f_1 > f_2$) или по часовой стрелке (при $f_2 > f_1$).

Действие двухступенчатого устройства САПАХ поясняет диаграмма на рис. 35.

При дефиците мощности в системе ЭЭС2 ($f_2 > f_1$) срабатывает основной блок угла при достижении вектором E_I угла γ_1 (вращение вектора — против часовой стрелки). Дополнительный блок угла при этом еще не сработал. Такое сочетание вызывает действие устройства в основной зоне, при этом, как было сказано выше, с помощью средств телепередачи сигналов производится отключение генераторов в системе ЭЭС1 и загрузка генераторов в системе ЭЭС2. Если эти воздействия оказались недостаточными, то угол продолжает увеличиваться до значения $\gamma_{доп}$, при котором срабатывает дополнительный блок угла и автоматически перестраивает уставку основного блока с γ_1 на $\gamma_{доп}$. При достижении этого значения угла срабатывает II ступень устройства, производя отключение электропередачи с обеспечением питания промежуточных подстанций от избыточной системы ЭЭС1.

Подчеркнем, что различие в управляющих воздействиях от устройства обеспечивается разными сочетаниями срабатывания дополнительного и основного блоков угла. Так, если рассмотреть АР при дефиците мощности в ЭЭС1 ($f_2 > f_1$), то срабатывание I ступени устройства происходит при угле γ_2' (вращение вектора E_I по часовой стрелке) при уже сработавшем (при угле $\gamma_{доп}$) дополнительном блоке угла. Такое сочетание вызывает иное действие устройства по сравнению с его срабатыванием при углах γ_1 или $\gamma_{доп}$ — например, это может быть действие на деление в другой точке электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатуров А. А.** Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. М. Энергия, 1977.
2. **Веников В. А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М. Высшая школа, 1978.
3. Ресинхронизация в энергосистемах после несинхронного АПВ/ Информационные материалы ВНИИЭ № 66. М. Госэнергоиздат, 1961.
4. **Портной М. Г., Рабинович Р. С.** Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. М. Энергия, 1978.
5. **Горбунова Л. М.** Исследование устойчивости нагрузки энергосистем/ Комплексная городская нагрузка и асинхронные двигатели: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974.
6. **Иофьев Б. И.** Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. М. Энергия, 1974.
7. **Барзам А. Б.** Системная автоматика. М. Энергия, 1964.
8. **Барзам А. Б.** Применение делительных защит для предотвращения и прекращения асинхронного режима// Электрические станции 1970 № 4. С. 59- 64.
9. **Бринкис К. А., Семенов В. А.** Селективная делительная защита при асинхронном ходе// Электрические станции 1975 № 2. С. 66—68.
10. **Гоник Я. Е.** Обобщенные способы выявления асинхронного хода// Вопросы обоснования и выбора параметров развивающихся систем. М. Энергия, 1974. С. 87—104 (Тр. ин-та Энергосетьпроект, Вып. 4).

11 **Гоник Я. Е.** Там же С 105—125

12. **Гоник Я. Е.** Влияние промежуточного отбора мощности на угол между векторами напряжения двух точек линии электропередачи и их взаимное скольжение// Вопросы автоматического управления энергосистемой при аварийных возмущениях М Энергия, 1976 С 140—155 (Тр ин-та Энергосетьпроект; Вып 7).

13 **Гоник Я- Е., Иофьев Б. И** Основное устройство автоматического прекращения асинхронного хода и некоторые особенности расчета его параметров срабатывания// Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем М Энергоиздат, 1982 С 68—73 (Сб. научи трудов ин-та «Энергосетьпроект»)

14 **Гоник Я. Е., Иофьев Б. И., Медведева Л. Н.** Резервное устройство автоматического прекращения асинхронного хода в энергосистеме// Электрические станции 1977. № 1 С 49—52

15. **Гоник Я. Е.** Отклик на статью А М Александрова «Использование дистанционной защиты в качестве автоматики прекращения асинхронного хода»// Электрические станции 1979 №4 С 71—72

16 **Гоник Я. Е.** О неправильной работе устройства АЛАР с пуском по току и счетчиком циклов// Электрические станции 1985 № 6 С 59—61

17 **Бринкис К. А., Семенов В. А.** Делительная автоматика от асинхронного хода// Электрические станции 1969 № 3 С 84—35

18. **Бринкис К. А.** Современные устройства на основе изменения угла// Сб. науч. трудов Рижск политехн. ин-та. Рига изд. РПН, 1984 С 145—161

19 **Электрические системы:** Автоматизированные системы управления режимами энергосистем/ В А Богданов, В А Веников, Я. Н. Лугинский, .Г. А Черня Под ред В. А. Веникова М Высшая школа, 1979

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие

- 1 Асинхронный режим в энергосистеме
 - 2 Режимные характеристики установившегося асинхронного режима
и способы его выявления
 - 3 Типовые устройства автоматики ликвидации асинхронного режима
 - 4 Устройство селективной автоматики ликвидации асинхронного режима на основе измерения угла
- Список литературы