

УДК 621.313.333

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ САМОЗАПУСКОМ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЦИФРОВЫМ РЕЛЕ SERAM 2000

В. В. КУРГАНОВ, Ю. В. КРЫШНЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

О. П. КАПТУРОВ

*Республиканское унитарное предприятие
«Гомельтранснефть Дружба»*

Постановка задачи

Актуальной задачей промышленной электроэнергетики является обеспечение устойчивости узла комплексной нагрузки, в состав которой входят асинхронные и синхронные двигатели различной мощности. В данной статье рассматриваются вопросы повышения надежности и увеличения быстродействия устройств автоматического включения резервного питания (АВР) синхронных двигателей на подстанциях РУП «Гомельтранснефть Дружба» с комплексной нагрузкой, укомплектованных цифровыми реле Seram 2000.

Решение задачи

В цифровых (микропроцессорных) реле типа Seram 2000 M08 синхронного двигателя (СД) и Seram 2000 B02 секционного выключателя (СВ) запрограммирована функция ресинхронизации, предназначенная для самозапуска СД при кратковременных перерывах питания [1].

Принцип действия функции ресинхронизации поясняется на примере двухтрансформаторной подстанции 110/6кВ (рис. 1), питающей мощные синхронные (СД) и асинхронные (АД) двигатели насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций (НПС). В зависимости от режима перекачки нефти количество и состав электродвигателей, подключенных к секции шин 6 кВ, может быть различным.

На секционном выключателе $Q_{СВ}$ установлено устройство АВР, срабатывающее при потере питания секции шин после предварительного гашения поля СД, которое осуществляется функцией ресинхронизации. Пусковой орган (ПО) АВР состоит из измерительного органа минимальной частоты (ИО_f), контролирующего частоту напряжения на секции шин, и измерительных органов реверса (обратной) активной мощности (ИО_p), установленных в цифровых реле СД (код 32Р). Пуск АВР осуществляется по факту снижения частоты и реверса активной мощности хотя бы в одном СД. При этом через выдержку времени 0,3–0,5 с на шинку ресинхронизации подается сигнал в тиристорные возбудители СД, переводящий их в инверторный режим с гашением поля. По окончании гашения поля, которое контролируется величиной остаточного напряжения $0,4U_{ном}$ на шинах, отключается выключатель ввода $Q_{В}$ и включается $Q_{СВ}$.

Опыт эксплуатации такого алгоритма ресинхронизации на подстанциях НПС «Пинск», «Мозырь», «Защелье» РУП «Гомельтранснефть Дружба» показал недоста-

точную его эффективность, поскольку в ряде случаев устройство АВР либо отказывало в работе, либо срабатывало с большой задержкой во времени, что вызывало перебои в работе нефтепроводного транспорта. При отказе функции ресинхронизации возбужденные СД длительно генерируют ЭДС через трансформаторы в питающую линию 110 кВ. В результате системная автоматика АПВ линии на выключателе Q_L вынужденно срабатывает со значительной задержкой, оставляя без питания на это время другие потребители энергосистемы, подключенные к данной линии с помощью отпаяк. Такие факты неоднократно были зарегистрированы работниками служб энергосистемы.

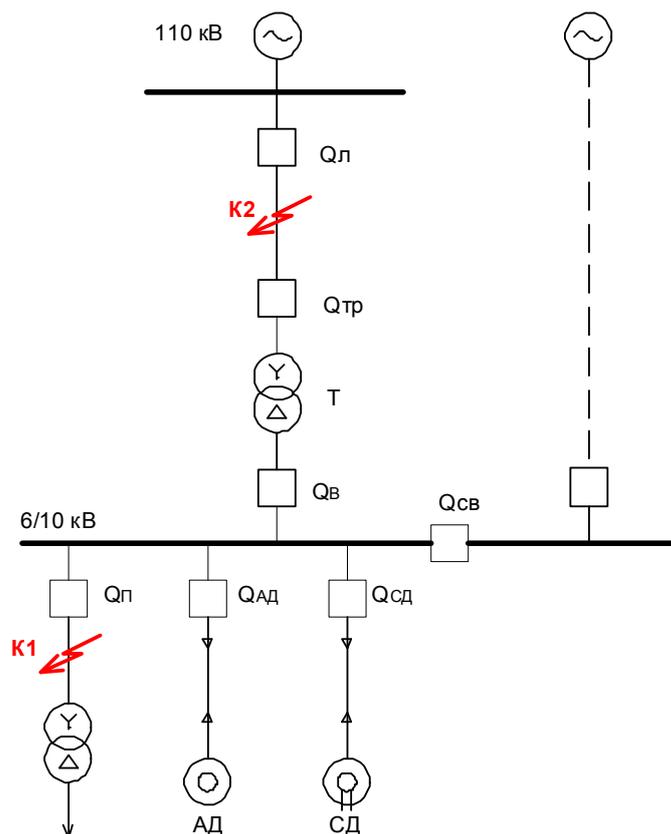


Рис. 1. Схема двухтрансформаторной подстанции НПС

Проанализируем поведение ПО АВР при различных аварийных режимах в системе электроснабжения (рис. 1).

1. Короткое замыкание (КЗ) произошло на отходящей от подстанции линии присоединения 6 кВ (точка К1). В этом случае СД подпитывают место КЗ и по реверсу мощности ИО_р срабатывает, но частота напряжения в сети остается неизменной 50 Гц и, в результате, ПО АВР не запускается. Рассматриваемое КЗ, как правило, отключается быстродействующей защитой присоединения Q_P , и СД не выпадают из синхронизма.

2. КЗ произошло в питающей линии (точка К2). В этом случае от собственной защиты отключается выключатель линии Q_L , СД теряют питание и при выбеге подпитывают место КЗ и нагрузку на секции шин 6 кВ. Создаются все условия для срабатывания ПО АВР – снижение частоты и реверс активной мощности.

3. Оперативное или неоперативное (ложное) отключение выключателя Q_L без КЗ на линии 110 кВ. Такой же режим появляется при самоустранившемся КЗ после от-

ключения $Q_{л}$. В этом случае, при наличии нагрузки на секции шин, в СД появляется обратная мощность, снижается частота и ПО АВР срабатывает.

4. Тот же режим, что и в п. 3, но кроме СД к секции шин подключена незначительная по величине сторонняя нагрузка (АД отключены). В этом случае в начале выбега обратная мощность в СД может быть недостаточная для срабатывания ИО_р и ПО АВР запускается со значительной задержкой во времени.

5. При аварии в энергосистеме возникает дефицит активной мощности и происходит общесистемное понижение частоты. В этом случае устройство АВР не должно срабатывать, иначе функция ресинхронизации, направленная на гашение поля СД, переведет их в асинхронный режим и увеличит и без того возникший при аварии дефицит реактивной мощности. В данном режиме сработает ИО_г, но активная мощность в СД будет направлена на потребление, а не на отдачу, и ИО_р заблокирует работу ПО АВР.

Таков алгоритм действия устройства АВР, заложенного в цифровых реле СД и секционного выключателя.

Анализируя поведения ПО АВР в рассматриваемых режимах, можно сделать вывод, что измерительные органы ИО_р в реле СД необходимы только для отличия режима дефицита активной мощности в системе от режима выбега СД. Во всех остальных случаях 1, 2, 3, 4 для пуска АВР достаточно иметь один измерительный орган минимальной частоты (ИО_г).

Разработчики цифровых реле Seram 2000 для выявления режима дефицита активной мощности использовали известный (классический) способ блокировки устройства автоматической частотной разгрузки (АЧР) при выбеге СД [3].

Согласно этому способу, на выключателе ввода $Q_{в}$ устанавливается реле направления мощности, которое ориентировано так, что при прямом направлении мощности от источника питания к шинам подстанции реле находится в сработанном состоянии и разрешает работу реле минимальной частоты устройства АЧР, что соответствует режиму дефицита активной мощности в энергосистеме. При потере питания и выбеге СД частота напряжения также снижается, но протекающая мощность по $Q_{в}$ либо отсутствует, либо направлена в противоположную сторону. В обоих случаях реле направления мощности работает на возврат, запрещая действие АЧР.

В цифровых реле Seram 2000, в отличие от классического способа, реле направления мощности (ИО_р) установлено не на вводе, а в каждом цифровом реле СД и при выбеге они работают на срабатывание, а не на возврат. Любое реле направления мощности имеет зону нечувствительности при малых значениях тока или его отсутствии, т. е. для срабатывания ИО_р необходима, хотя и малая, но конечная величина обратной активной мощности (1,5–2 % $P_{ном.СД}$). Характеристика срабатывания ИО_р реле Seram 2000 приведена на рис. 2. Если величина и знак активной мощности СД попадает в зону срабатывания (незаштрихованная область), то с выхода ИО_р разрешающий сигнал (логическая единица) поступает в ПО АВР.

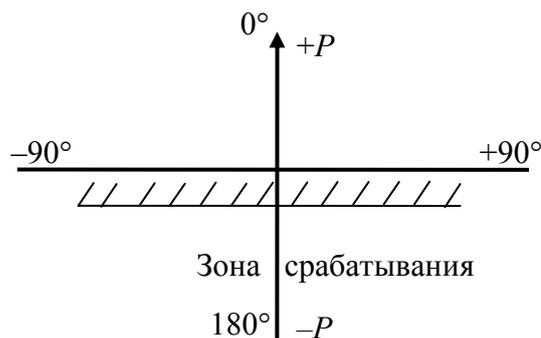


Рис. 2. Характеристика срабатывания существующего ИО.р в реле Seram 2000

На действующей подстанции ЛПДС «Мозырь» «Гомельтранснефть Дружба» были проведены экспериментальные исследования режимов совместного выбега СД и АД с осциллографированием токов синхронного двигателя и напряжения на секции шин с помощью цифрового регистратора (рис. 3).

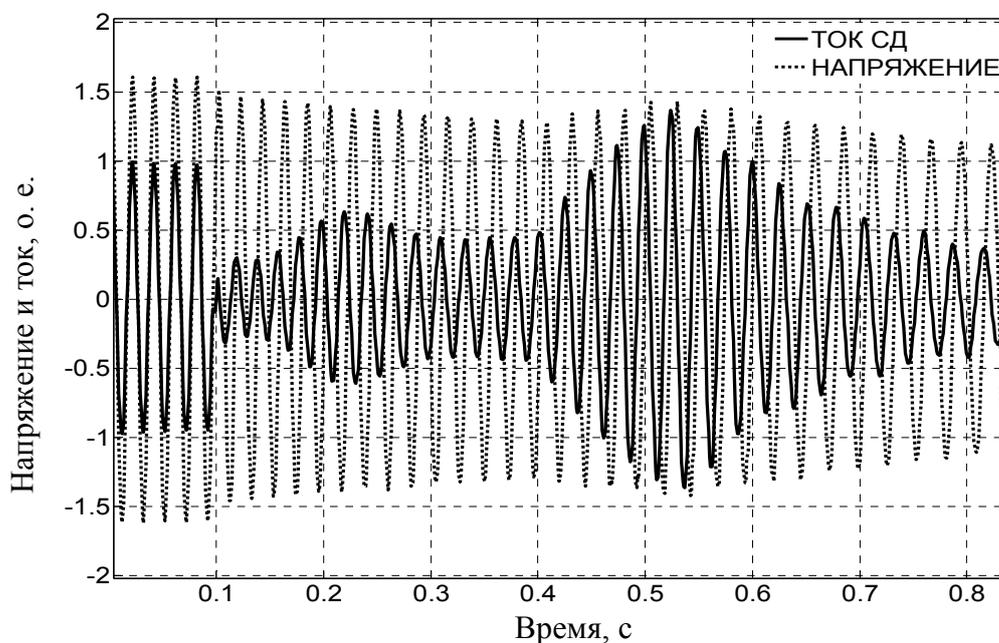
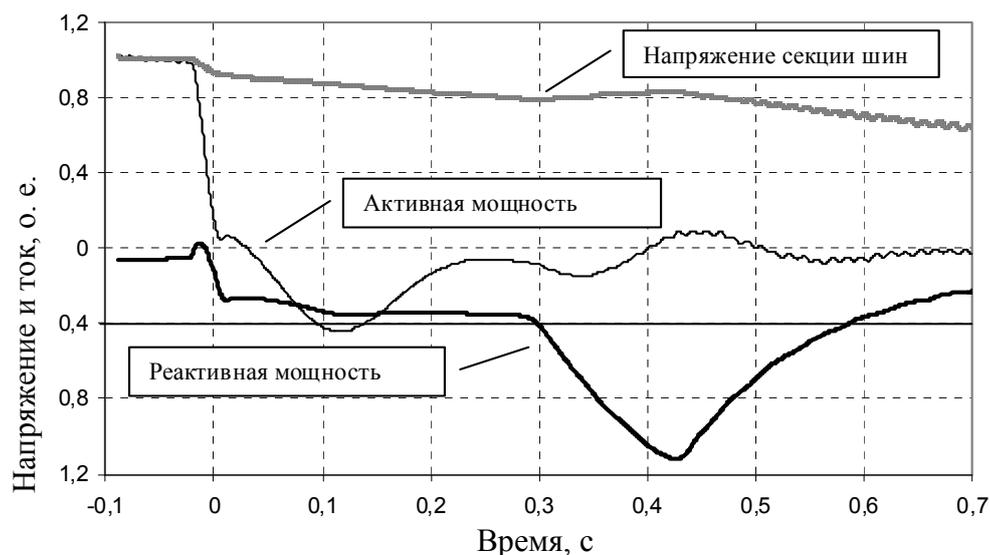


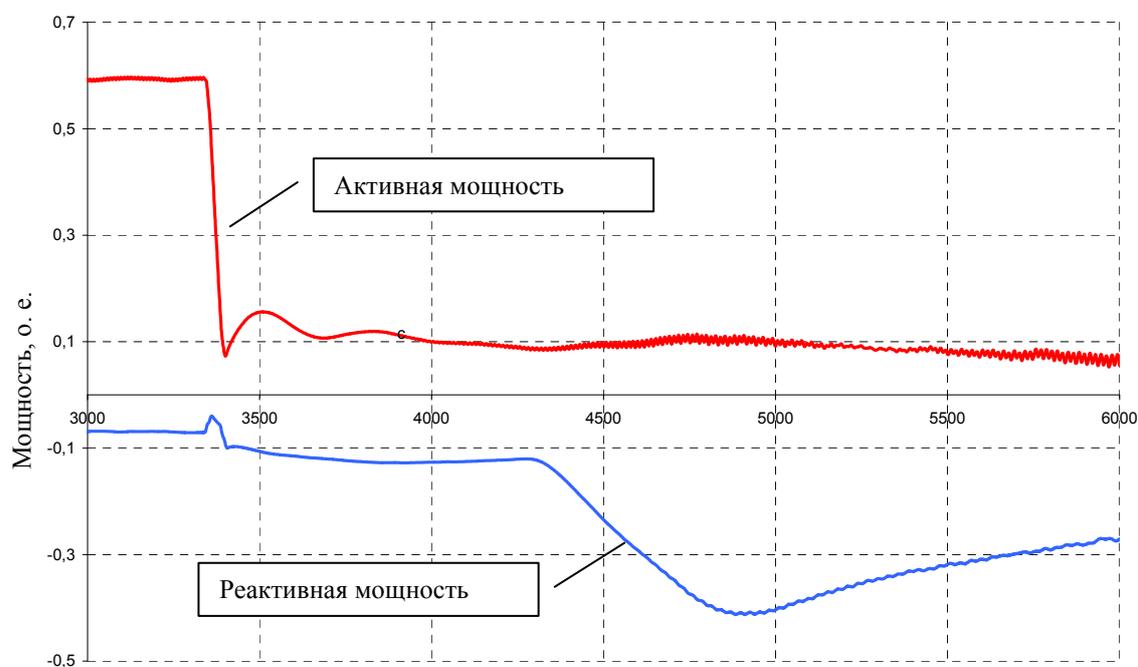
Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока СД при выбеге СД и АД

В первом опыте к секции шин были подключены синхронный двигатель мощностью 3150 кВт и асинхронные двигатели 4000 кВт и 1600 кВт, а также небольшая сторонняя нагрузка собственных нужд и возбуждателя СД.

Обработка полученных данных с вычислением активной и реактивной составляющих мощности СД проводилась в пакете Matlab, затем полученные данные обрабатывались в программе Excel. Изменение знака и модуля активной и реактивной составляющих мощности синхронного двигателя приведены на рис. 4, а и б соответственно для 1-го и 2-го опытов.



а)



б)

Рис. 4. Активная и реактивная составляющие мощности синхронного двигателя при совместном выбеге СД и АД: а – при первом опыте; б – при втором опыте

В первом опыте из рис. 4, а видны следующие характерные особенности совместного выбега синхронного и асинхронных двигателей.

В нормальном режиме синхронный двигатель потреблял практически только активную мощность ($\cos\varphi \approx 1$). В момент потери питания произошел резкий провал напряжения на шинах примерно на 10 %, активная мощность СД при этом снизилась до нуля, а реактивная (отдаваемая) мощность немного возросла.

В процессе выбега двигателей напряжение постепенно снижается, а реактивная мощность растет. В момент времени 0,3 с от начала выбега напряжение снизилось до значения $0,8U_{ном}$ и автоматика возбуждательного устройства включила форсировку

возбуждения СД. Это вызвало рост напряжения и реактивной мощности СД. Однако через 0,13 с при частоте вращения около 44,5 Гц напряжение и реактивная мощность стали снижаться с повышенной скоростью. С набросом реактивной нагрузки произошло ускоренное торможение СД, а следовательно, и затухание кинетической энергии двигателей. Кроме того, ток возбуждательного устройства, питающегося от пониженного напряжения, стал резко снижаться, что и вызвало дальнейшее снижение отдаваемой мощности СД и в итоге – отключение двигателей от защит возбуждательного устройства и минимального напряжения.

Активная мощность СД изменяется по более сложному закону. В первоначальный момент времени после отключения питания за счет инерционности электрических машин активные составляющие мощности двигателей снижаются до нуля. Затем через 0,15 с происходит рост обратной (отдаваемой) активной мощности СД в течение примерно 0,1 с, потом снова ее снижение почти до нуля. Так периодически происходят колебания обратной активной мощности. Эти колебания можно объяснить переходными электромеханическими процессами обмена энергией между выбегающими СД и АД, а также апериодической составляющей тока в начале процесса. Постоянные времена агрегатов двигатель-механизм различны для СД и АД, поэтому торможение двигателей при совместном их выбеге происходит по-разному. Максимум (горб) активной мощности свидетельствует о синхронизации выбега асинхронного и синхронного двигателей в этот промежуток времени. Форсировка возбуждения СД также вносит дополнительные колебания активной мощности. При этом отмечается даже кратковременное изменение знака с минуса на плюс активной мощности в интервале времени $t = 0,4-0,5$ с на рис. 4, а.

Во втором опыте из рис. 4, б видно, что активная мощность СД при выбеге вообще не изменяла знак и была положительной, т. е. СД потреблял при выбеге небольшую по величине активную мощность (около 16 % мощности исходного режима).

В [3] при описании совместного выбега асинхронного и синхронного двигателей предполагается, что синхронный двигатель, переходя в генераторный режим, подпитывает своим током асинхронный. Однако результаты проведенных экспериментов и последующего моделирования показывают, что данное утверждение справедливо только для реактивной составляющей тока. Активная же составляющая тока либо не изменяет знак, либо имеет колебательный характер с периодичностью, равной разности угловых частот СД и АД, причем эта величина зависит от соотношения мощностей выбегающих двигателей, их постоянных времени и коэффициентов загрузки агрегатов.

Таким образом, измерительный орган направления активной мощности (ИО.р) в реле СД в условиях первого опыта будет периодически срабатывать и возвращаться, а, учитывая, что ИО.р имеет собственную выдержку времени срабатывания 0,1 с и согласно алгоритму ресинхронизации сигнал от ИО.р, необходимый для срабатывания выходного реле времени ресинхронизации, должен быть непрерывным в течение времени не менее 0,3–0,5 с, то в данном узле нагрузки произойдет отказ в срабатывании устройства АВР.

Во втором опыте ИО.р вообще, в принципе, не мог сработать, поскольку обратная мощность в СД не появлялась. При совместном выбеге СД и сторонней нагруз-

ки, питающейся через трансформаторы 6/0,4 кВ, АВР, как правило, успевает сработать, но со значительной задержкой во времени.

Рассмотрим принцип действия измерительного органа ИО_р цифрового реле СД. Назовем его, для краткости, реле направления мощности, аналогом которого являются реле типа РБМ-171 и РМ-11.

В технике релейной защиты эти реле применяются в направленных защитах от междуфазных КЗ. Для исключения влияния напряжения нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю реле направления мощности включаются на фазный ток и междуфазное напряжение, причем внутренний угол их, так называемый угол максимальной чувствительности, устанавливается в виде уставки реле и принимается равным $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$ или $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$.

Момент, действующий на срабатывание реле, определяется выражением:

$$M = \kappa U_p I_p \cos(\varphi_p + \varphi_{м.ч}), \tag{1}$$

где U_p, I_p – напряжение и ток, подводимые к реле; φ_p – угол сдвига фаз между векторами U_p и I_p .

Реле направления мощности в фазе А включается на ток фазы А и напряжение между фазами С и А, т. е. $I_p = I_A, U_p = U_{CA}$ (реле в других фазах включаются аналогично). Угловая характеристика реле фазы А приведена на рис. 5.

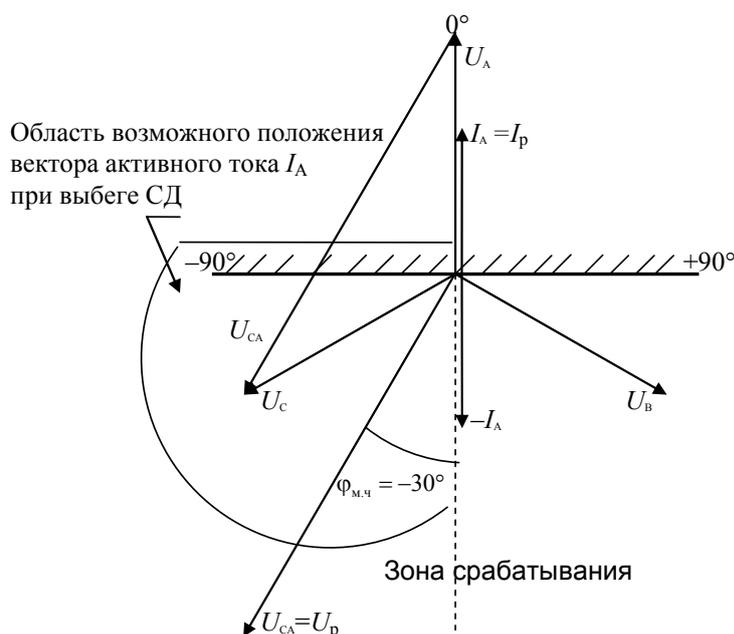


Рис. 5. Угловая характеристика срабатывания реле направления активной мощности СД: реле фазы А включается на ток фазы I_A и напряжение U_{CA} ; реле фазы С включается на ток фазы I_C и напряжение U_{AB} ; угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$

Зона срабатывания реле строится следующим образом. От вектора U_{CA} откладывается угол $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$ в сторону опережения и проводится прямая линия (пунктирная), которая называется линией максимальной чувствительности. К этой линии проводится перпендикулярная линия, называемая линией нулевых моментов, и заштриховывается область, противоположная линии максимальной чувствительности.

Если вектор тока I_A попадает в незаштрихованную область угловой характеристики, то реле срабатывает. При этом минимальная мощность срабатывания реле предполагается равной нулю [2].

При анализе поведения реле представляет интерес угол φ сдвига фаз между током I_A и создавшим его фазным напряжением U_A . Преобразуем выражение (1) с учетом изменения на обратное направления тока I_A :

$$\begin{aligned} M &= \kappa U_{CA} (-I_A) \cos(\varphi_p + \varphi_{м.ч}) = \kappa_1 U_A e^{-j150^\circ} \cdot I_A e^{j180^\circ} \cos(\varphi + \varphi_{м.ч}) = \\ &= \kappa_1 U_A I_A \cos(\varphi - 150 + 180 - 30) = \kappa_1 U_A I_A \cos \varphi. \end{aligned}$$

Следовательно, при таком включении реле реагирует на активную мощность СД, т. к. $P = S \cos \varphi$. Величина P имеет отрицательный знак (обратная активная мощность) при изменении угла φ от -90° до -270° . Реактивная мощность не создает момента на реле, так как составляющая реактивного тока I_A сдвинута относительно напряжения U_A на 90° и вектор ее попадает на линию нулевых моментов.

По данным второго опыта средняя потребляемая активная мощность СД при выбеге составила около 16 %. Проведя горизонтальную линию на уровне 16 % от I_A , получим на рис. 5 область возможного положения вектора активного тока I_A при выбеге СД. Следовательно, для того, чтобы эта область входила в зону действия реле, необходимо сместить вверх граничную линию нулевых моментов на величину не менее $0,2P_{\text{ном.СД}}$. Однако сделать это для данной характеристики невозможно, поскольку, согласно (1), при $I_A = 0$ и $M = 0$. Поэтому одним из вариантов усовершенствования функции «ресинхронизации» является применение в цифровом реле СД ИОР направления прямой (потребляемой), а не обратной, активной мощности СД с повышенной зоной нечувствительности, равной $P_{\text{мин}} = 0,2P_{\text{ном.СД}}$ (рис. 6).

Для этого необходимо на реле направления мощности поменять полярность напряжения, т. е. подать $U_p = U_{AC}$, но это должно быть выполнено программным путем. Цель – при малых значениях активной мощности или при ее колебаниях ИОР будет устойчиво (непрерывно) находиться в зоне несрабатывания (возврата). При этом сигнал с выхода ИОР будет соответствовать логическому 0. Для того, чтобы алгоритм ПО АВР в дальнейшем не нарушился, целесообразно этот сигнал инвертировать, т. е. преобразовать в логическую 1 с помощью дополнительно включенного элемента НЕ. В этом случае логическая 1, разрешающая срабатывания ПО АВР, будет подаваться при снижении активной мощности от $+P_{\text{мин}}$ до $-P$, т. е. при выбеге СД.

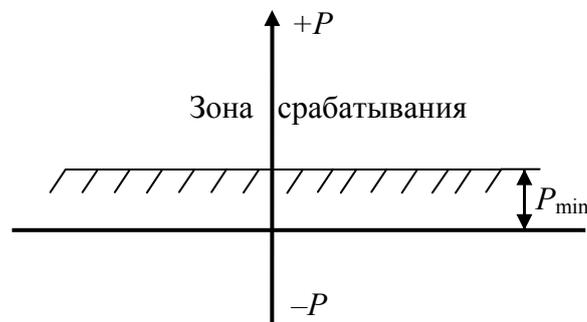


Рис. 6. Характеристика срабатывания предлагаемого ИОР

В режиме дефицита активной мощности в энергосистеме ИОР будет находиться в сработанном состоянии, поскольку СД потребляет активную мощность, значитель-

но превышающую P_{\min} . В этом случае с выхода элемента НЕ поступит логический 0, который заблокирует работу ПО АВР.

Предлагаемая схема формирования знака активной (потребляемой) мощности в реле СД приведена на рис. 7. Для исключения ложного срабатывания ИО_р при отключении выключателя синхронного двигателя в схему, кроме того, введен логический элемент И, на один из входов которого подается сигнал, соответствующий положению выключателя СД. Информация о включенном или отключенном положении выключателя имеется в существующем цифровом реле СД.

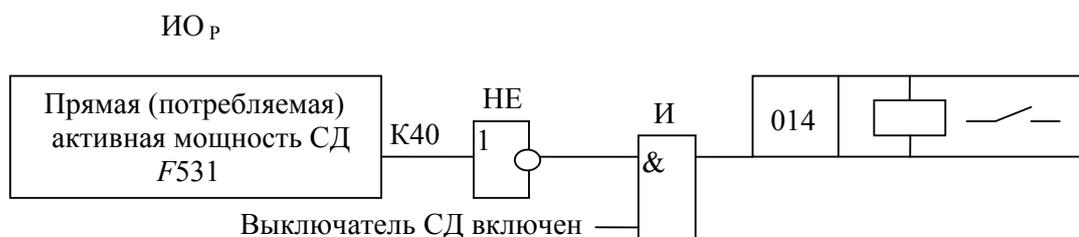


Рис. 7. Предлагаемая схема формирования выходного сигнала ИО_р в реле СД

Коротко сформулируем предлагаемый алгоритм действия функции ресинхронизации СД и АВР: *если выключатель синхронного двигателя включен и активной мощности он практически не потребляет, а частота напряжения при этом снижается, то это свидетельствует о том, что двигатель потерял питание и необходимо быстро погасить его поле и переключить на резервный источник питания.*

В качестве второго варианта усовершенствования функции «ресинхронизации» можно предложить применение измерительного органа направления полной мощности ИО_с, который необходимо включить на ток $I_p = I_A$ и напряжение $U_p = U_{CB}$ при $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$. Угловая характеристика такого ИО_с приведена на рис. 8.

Данный ИО_с сработает в том случае, когда вектор тока I_A повернется на угол меньше -45° , т. е. условие срабатывания реле следующее:

$$-225^\circ \leq \varphi \leq -45^\circ.$$

Проведенные эксперименты при выбеге СД показали, что угол φ изменялся в первом опыте в пределах от -130° до -85° , во втором опыте – от -50° до -85° , т. е. в обоих случаях вектор тока находился в зоне срабатывания реле.

Оба эти предложения предполагают изменение программного обеспечения измерительного органа ИО_р в цифровых реле СД, которое для пользователя недоступно (доступно только для фирмы производителя), кроме случая, если для изменения знака активной мощности в меню реле СД имеется *status* параметра *ввод* или *отходящий фидер*, по аналогии с функцией F541 – величина и направление реактивной мощности, применяющейся в защите СД от асинхронного режима (код 32Q).

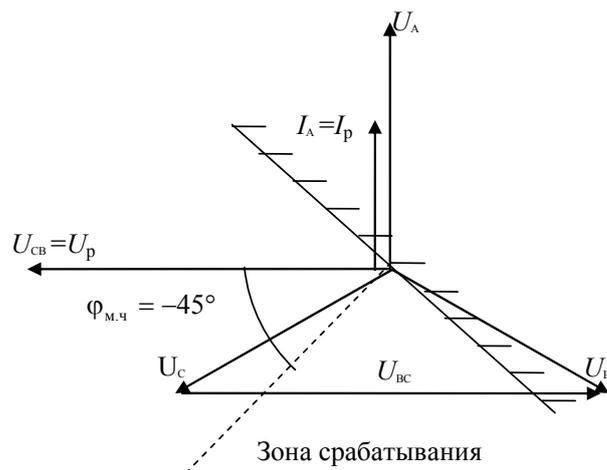


Рис. 8. Угловая характеристика срабатывания реле направления полной мощности СД: реле фазы А включается на ток фазы I_A и напряжение U_{CB} ; реле фазы С включается на ток фазы I_C и напряжение U_{BA} ; угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$

Заключение

Сформулированные в работе предложения могут быть практически реализованы только специалистами представительства фирмы «Шнейдер Электрик» в г. Киеве (Украина), которые обслуживают реле Sepam 2000 в РУП «Гомельтранснефть Дружба». Необходимо изменение алгоритма действия измерительного органа реверса активной мощности ИО._р реле Sepam 2000 M08 с последующими испытаниями в присутствии авторов устройства АВР при комплексной нагрузке на секции шин (СД и АД).

Литература

1. Информационные материалы по цифровым реле серии Sepam 2000 : справ. продукции фирмы «Schneider Electric», 2003. – 347 с.
2. Курганов, В. В. Выбор защитных характеристик и расчет уставок цифровых реле / В. В. Курганов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2005. – 103 с.
3. Слодарж, М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М. И. Слодарж. – Москва : Энергия, 1977. – 215 с.

Получено 23.10.2008 г.