

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА УЛАВЛИВАНИЯ СИНХРОНИЗМА В МИКРОПРОЦЕССОРНОМ УСТРОЙСТВЕ «СИРИУС-3-ЛВ-03» ДЛЯ ЛИНИЙ 110–220 КВ

БОБРОВ С.Е., асп.

Представлены результаты исследования на математической модели и на практике алгоритма улавливания синхронизма, используемого при реализации функции автоматического повторного включения в микропроцессорном терминале «Сириус-3-ЛВ-03».

Ключевые слова: устройство автоматического повторного включения, синхронизм встречных напряжений, микропроцессорная техника, алгоритм улавливания синхронизма, математическая модель.

INVESTIGATING THE SYNCHRONIZATION ALGORITHM IN MICROPROCESSOR UNIT «SIRIUS-3-LV-03» FOR 110-220 KILOWATT LINES

S.E. BOBROV, Post Graduate Student

The article represents the research results of synchronization algorithm on mathematical model and in practice. It can be used for realization of automated reclosing function in microprocessor unit “Sirius-3-LV-03”.

Key words: automated reclosing device, synchronism of opposite voltage, microprocessor engineering, synchronization algorithm, mathematical model.

При отключении линии электропередачи (ЛЭП) устройствами релейной защиты (УРЗ) наиболее эффективным средством, предотвращающим развитие аварийной ситуации, является устройство автоматического повторного включения (АПВ). Наиболее актуальна установка устройств АПВ на сильно загруженных магистральных ЛЭП, где отключение линии вызывает внезапные скачкообразные нарушения баланса мощностей, что обычно приводит к развитию аварии. Различают два основных вида АПВ линии: несинхронное («слепое») АПВ и АПВ с контролем синхронизма (КС).

АПВ с КС применяется при невозможности использования несинхронного АПВ. Указанный вид АПВ производит проверку допустимости включения по условию синхронизма встречных напряжений. Синхронизация осуществляется с помощью специальных органов, исключающих возможность несинхронных включений. Эти органы состоят из реле, контролирующего напряжения на линии и шинах, реле контроля синхронизма и реле, реагирующего на разность векторов напряжений на линии и шинах [1].

Устройства АПВ с КС, согласно [1], имеют две разновидности: АПВ с ожиданием синхронизма (АПВ ОС) и АПВ с улавливанием синхронизма (АПВ УС). АПВ ОС предназначается для осуществления АПВ линий, имеющих несколько достаточно мощных шунтирующих связей. АПВ ОС обеспечивает АПВ отключившейся линии лишь при сохранении в работе этих связей, т.е. при условии, когда возможно сохранение синхронности работы источников питания. АПВ УС предназначается для осуществления АПВ линий, при отключении которых вследствие отсутствия шунтирующих связей или малой пропускной способности последних

происходит нарушение синхронной работы частей системы.

Предприятием ЗАО «РАДИУС-Автоматика» было разработано микропроцессорное (МП) устройство релейной защиты «Сириус-3-ЛВ-03», совмещающее в себе функции защиты и автоматики [2]. В состав указанного устройства входит функция контроля синхронизма, которая предполагает включение выключателя с улавливанием или ожиданием синхронизма. Включение с ожиданием синхронизма подразумевает выдачу сигнала при выполнении трех условий: по разности частот, по разности векторов напряжений на линии и шинах и по наличию напряжения на линии и шинах.

Блок улавливания синхронизма в МП-устройстве, в отличие от ранее используемых электромеханических реле контроля синхронизма, выполняющих функции улавливания синхронизма, реализуется с постоянным временем опережения, что подразумевает расчет угла опережения, на который сблизятся вектора напряжений на линии и шинах за время, равное времени включения выключателя. Причем при расчете угла опережения учитывается как скорость скольжения, так и ускорение скорости скольжения, что обеспечивает более точное включение. Сигнал на включение выдается при совпадении расчетного угла опережения с текущим. Дополнительно блоком улавливания синхронизма, по аналогии с блоком ожидания синхронизма, контролируется разность векторов напряжений на линии и шинах, а также наличие напряжения на линии и шинах. Благодаря такому принципу выполнения блока УС, МП-устройство при скольжении, неизбежном в случае размыкания транзита, обеспечивает улавливание момента для подачи команды на включение выключателя.

При кажущейся простоте алгоритма включения выключателя с улавливанием синхронизма, он подвергся наибольшей модернизации со времени первых панелей АПВ УС.

Использование математической модели заключается в моделировании изменения частот в различных частях ЭЭС при их разделении. Согласно [3], в ЭЭС, состоящей из ряда станций и нагрузок, можно различать следующие изменения частоты:

1) быстрые и средние (мгновенные или текущие), происходящие во время переходного процесса, связанные с изменением скорости генератора, возникающие под влиянием небалансов вращающих моментов на валах генераторов;

2) относительно медленные (средние значения), характерные для системы в целом, определяющиеся эквивалентной инерцией всех машин системы и действием автоматических регуляторов частоты вращения и автоматических регуляторов частоты.

Отключение КЗ на линиях с двухсторонним питанием сопровождается изменением частоты в системах по обеим сторонам отключенной линии. При этом изменения частоты, происходящие в энергосистеме, спустя некоторое время после отключения компенсируются автоматическими регуляторами частоты вращения и автоматическими регуляторами частоты. На основании [3], после появления небаланса ΔP выделяют следующие, по времени возникновения, процессы, происходящие в энергосистеме:

1) относительно быстрые электромагнитные и электромеханические процессы, при которых регуляторы не действуют;

2) электромеханические процессы средней скорости, происходящие при действии регуляторов частоты вращения;

3) медленные процессы, происходящие при действии регуляторов частоты.

Второй и третий из указанных процессов связаны с действием автоматического регулятора частоты вращения (АРЧВ), воздействующего на работу турбины в течение нескольких секунд после начала изменения частоты и устраняющего малые отклонения частоты (от 1 до 4 %) с периодом менее 1 мин, а также автоматического регулятора частоты (АРЧ), перекрывающего более значительные колебания частоты.

Однако время воздействия указанных регуляторов достигает нескольких десятков секунд. По сравнению с выдержкой времени АПВ, указанное время намного больше. Поэтому для оценки работы алгоритма улавливания синхронизма указанными регулирующими воздействиями можно пренебречь.

В [3] приведены динамические характеристики системы при изменении частоты с учетом действия АРЧВ и АРЧ. При этом рассматриваются два случая работы системы: с резервом мощности и без резерва. Оба из этих ре-

жимов имеют экспоненциальный характер изменения частоты в энергосистеме на первом участке (от 0 до 4 с), который является основным при АПВ выключателя с улавливанием синхронизма. Для упрощения расчетов воспользуемся выражением, описывающим изменение частоты в энергосистеме без резерва мощности. Указанное выражение выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta f}{f_{НОМ}} = \left(-\frac{\Delta P_0}{P_{НО} b_f} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{JЭ}}} \right),$$

где ΔP_0 – разность в мощностях между нагрузкой системы и эквивалентной мощностью всех турбин, входящих в ту же систему; $P_{НО}$ – мощность нагрузки системы в начальный момент времени; b_f – регулирующий коэффициент нагрузки; $T_{JЭ}$ – эквивалентный момент инерции для системы.

Худшие условия для работы алгоритма улавливания синхронизма представляются при отключении транзитной линии, не имеющей обходных связей. В этом случае частота скольжения между двумя образовавшимися ЭЭС будет наибольшей. При этом одна из новообразовавшихся ЭЭС будет испытывать дефицит мощности, в то время как другая – избыток мощности. С учетом этого рассмотренная выше экспоненциальная зависимость изменения частоты для одной ЭЭС будет возрастающей, для другой – спадающей.

На рис. 1 представлен пример динамической характеристики частот на линии и шинах, а также частоты скольжения между двумя системами.

Качество работы алгоритма определяется по углу между двумя синхронизируемыми напряжениями в момент окончательного включения выключателя, т.е. через время, равное времени включения выключателя после выдачи сигнала на включение. Наиболее точное включение будет при значении угла, близком к нулю.

На основании временных диаграмм изменения частот на линиях и шинах, при заданном значении времени опережения, равном 0,08 с, а также максимально допустимой угловой погрешности между двумя синхронизируемыми напряжениями при включении выключателя, равной 40° , получим, что максимальная частота скольжения, при которой возможно включение, равна 2 Гц.

В табл. 1 приведены результаты анализа работы алгоритма улавливания синхронизма на математической модели.

На рис. 2 приведены временные диаграммы синхронизируемых напряжений (соответствует сигналу № 4 табл. 1) и отмечены момент подачи команды на включение выключателя и момент замыкания контактов выключателя.

Анализ данных (табл. 1) показывает, что исследуемый алгоритм улавливания синхрониз-

ма обеспечивает угловую погрешность в момент включения выключателя, не превышающую единиц градусов в достаточно большом диапазоне частот скольжения.

Кроме исследований на математической модели были проведены также экспериментальные испытания алгоритма улавливания синхронизма. Для этого к входам UA, UB и UC МП-терминала «Сириус-3-ЛВ-03» подключали трехфазный источник напряжения, а к входу UVЛ – однофазный источник. Между собой источники были синхронизированы. Проверка проводилась при заданной частоте скольжения, т.е. при отсутствии ускорения. Результаты экспериментальных исследований сведены в

табл. 2. Расчет величины угла между синхронизируемыми напряжениями производился на основании векторной диаграммы программы просмотра осциллограмм. Эксперименты были проведены при заданном времени опережения, равном 0,1 с, и максимальной допустимой угловой погрешности, равной 40°. На рис. 3 показана осциллограмма работы терминала при частоте скольжения –0,9 Гц, включающая временные диаграммы напряжений UA и UVЛ, реле «Включение» и блока улавливания синхронизма, а также векторную диаграмму, отражающую угол между синхронизируемыми напряжениями.

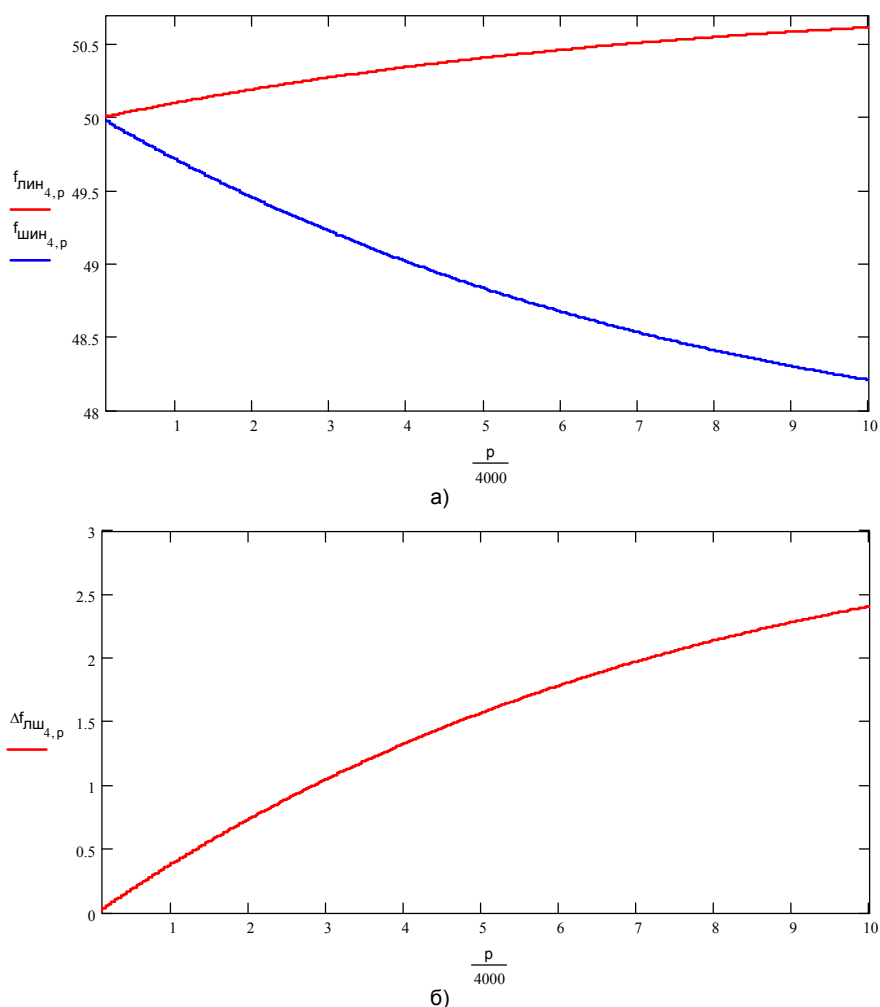


Рис. 1. Временные диаграммы изменения частот: а – на линии и шинах; б – скольжения

Таблица 1

№	Время выдачи сигнала на включение, с	Частота скольжения в момент выдачи сигнала на включение, Гц	Ускорение скорости скольжения в момент выдачи сигнала на включение, град/с ²	Угол между синхронизируемыми напряжениями в момент выдачи сигнала на включение, град.	Погрешность, град.
1	2,21	0,79	130,514	-22,99	-1,805
2	3,21	1,098	116,065	-34,682	-1,504
3	4,01	1,317	104,831	-37,653	-2,981
4	4,71	1,491	96,172	-40,746	-1,554
5	5,32	1,632	88,977	-50,682	-1,648
6	5,90	1,755	82,598	-56,366	-3,684
7	6,44	1,863	77,036	-58,127	-2,22
8	6,96	1,959	72,158	-61,08	-2,31

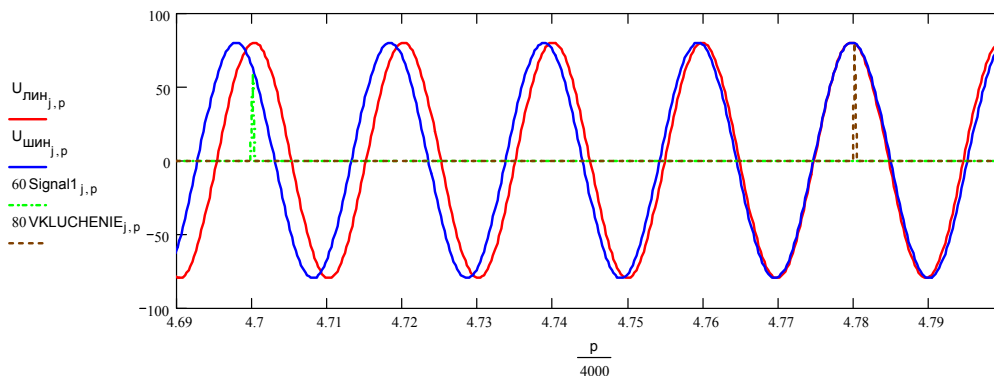


Рис. 2. Временные диаграммы синхронизируемых напряжений и работы алгоритма улавливания синхронизма

Таблица 2

№	Частота напряжения на шинах, Гц	Частота напряжения на линии, Гц	Частота скольжения, Гц	Значение угла между синхронизируемыми напряжениями в момент включения выключателя, град.
1	48,0	50	2,0	2,7
2	48,2	50	1,8	3,1
2	48,4	50	1,6	2,7
3	48,6	50	1,4	2,7
4	48,8	50	1,2	2,7
5	49	50	1	3,3
6	49,2	50	0,8	4,4
7	49,4	50	0,6	3,5
8	49,6	50	0,4	2,7
9	49,8	50	0,2	1,5
10	50,3	50	-0,3	1,5
11	50,5	50	-0,5	2,5
12	50,7	50	-0,7	4,1
13	50,9	50	-0,9	1,1
14	51,1	50	-1,1	2,2
15	51,3	50	-1,3	2,6
16	51,5	50	-1,5	1,5
17	51,7	50	-1,7	4,5
18	51,9	50	-1,9	2,9

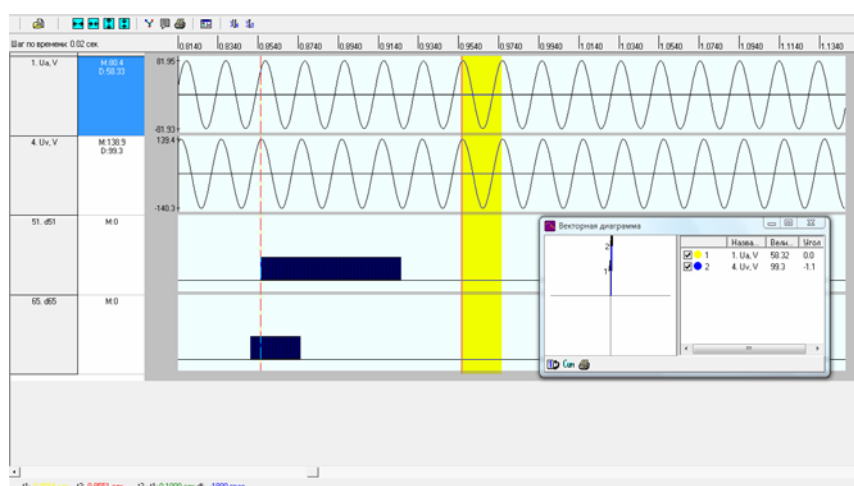


Рис. 3. Осциллограмма работы терминала

Погрешность при включении выключателя (см. табл. 1, 2) объясняется увеличением расчетного угла опережения, поскольку равен-

ство двух величин практически недостижимо. Основное неравенство, на основании которого формируется сигнал срабатывания алгоритма

улавливания синхронизма, записывается следующим образом:

$$-\Delta\varphi_{ПОГР} \leq \varphi_{ОП_РАСЧ} - \Delta\varphi_{ТЕК} \leq \Delta\varphi_{ПОГР},$$

где $\Delta\varphi_{ПОГР}$ – задаваемая погрешность при включении; $\varphi_{ОП_РАСЧ}$ – расчетный угол опережения; $\Delta\varphi_{ТЕК}$ – текущее значение угла между синхронизируемыми напряжениями.

Задаваемая погрешность зависит от скорости скольжения, ограничивается значением, равным 5° , и записывается в следующем виде:

$$\Delta\varphi_{ПОГР} = \frac{1}{2} \cdot \frac{360 \cdot \left| \frac{1}{50 - \Delta f_{ТЕК}} - \frac{1}{50} \right|}{0,02},$$

где $\Delta f_{ТЕК}$ – текущая частота скольжения.

Скорость срабатывания блока улавливания синхронизма от начала синхронизации можно оценить по интервалу между сигналами срабатывания указанного блока. Следует заметить, что при снижении частоты скольжения снижается значение угла опережения, причем при отсутствии ускорения скорости скольжения эта зависимость имеет линейный характер. Из этого следует, что при стремлении частоты скольжения к нулю расчетный угол опережения тоже стремится к нулю. В целом, интервал между сигналами срабатывания блока УС зависит от частоты скольжения и имеет обратнопропорциональную зависимость, которая представляется следующим выражением:

$$T = \frac{1}{f_s},$$

где f_s – частота скольжения между синхронизируемыми напряжениями.

Таким образом, при частоте скольжения менее 0,2 с интервал между сигналами срабатывания блока УС будет составлять более 5 с.

Бобров Сергей Евгеньевич,
ЗАО «Радиус-Автоматика» (г. Зеленоград, Москва),
инженер 2 категории,
телефон 8-960-506-87-56.

Заключение

Современное развитие микропроцессорной техники позволяет реализовать все виды АПВ линий в одном устройстве.

Реализация алгоритма улавливания синхронизма на микропроцессорной технике позволяет упростить алгоритм и уменьшить погрешности по углу включения.

Погрешность, зависящая от текущей частоты скольжения, введенная в целях ускорения процесса включения, обеспечивает большую адаптивность алгоритма к реальным условиям функционирования сети.

Приведенные результаты исследования работы алгоритма улавливания синхронизма как на математической модели, так и на практике показали, что значение угла между синхронизируемыми напряжениями в момент включения выключателя находится в пределах от -5° до 5° , что входит в заданную погрешность. Использование АПВ с улавливанием синхронизма при частоте скольжения менее 0,2 Гц нецелесообразно, поскольку в этом случае включение может затянуться на время более 5 с, что является недопустимым.

Список литературы

1. **Богорад А.М., Назаров Ю.Г.** Автоматическое повторное включение в энергосистемах. – М.: Энергия, 1969.
2. **Микропроцессорное** устройство защиты линий 110-220 кВ «Сириус-3-ЛВ-03». Техническое описание и руководство по эксплуатации. – М.: ЗАО «РАДИУС Автоматика», 2007.
3. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебник для электроэнергетических спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985.