

УДК 621.316.1 + 621.315.1

ИССЛЕДОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗОК ФАЗ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ВЛ 380 В НА ВЕЛИЧИНУ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ И ИХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В НОРМАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СЕТЕЙ

Г.С. Валеев, Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, С.А. Колесников

Приведена компьютерная модель электрической сети, состоящей из трехфазного источника, понижающего трансформатора и двух ВЛ 380 В с сосредоточенными нагрузками в конце, и результаты исследований режимных параметров сети в функции степени несимметрии нагрузок фаз в нормальных эксплуатационных режимах работы при различных сочетаниях сопротивлений заземляющих устройств потребителей.

Ключевые слова: электрические сети, воздушные линии напряжением 380 В, несимметрия нагрузок фаз.

Исследованию процессов, происходящих в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями (ВЛ), посвящено достаточно много работ, проведенных в различные периоды времени становления и развития распределительных сетей указанного выше напряжения. Значительная часть этих работ была направлена на установление характерных признаков, присущих аварийным режимам и разработке на их основе средств защиты электрических сетей и повышения уровня их электробезопасности.

Одним из основных звеньев таких защит является устройство распознавания аварийных режимов, в которых производится выявление признаков аварий. В качестве таких признаков, как правило, принимаются допустимые граничные значения величин контролируемых параметров в нормальных эксплуатационных режимах работы сети, таких как фазные напряжения, токи и их симметричные составляющие.

Следует отметить, что на величину модулей и фаз напряжений, как фазных, так и линейных, а также токов и их распределение в сети оказывает влияние множество факторов, такие как технические параметры понижающих трансформаторов, их внешние характеристики, параметры воздушных линий, величины и места расположения повторных заземлителей нулевого провода, сопротивления заземляющих устройств потребителей и трансформаторных подстанций, степень загрузки фаз ВЛ и их несимметрия, наличие разветвленных параллельно работающих линий, распределение нагрузок вдоль линии, характер нагрузок и многое другое.

Учитывая вышесказанное, нетрудно предположить, что аналитическое решение задачи по определению указанных режимных параметров с учетом всех влияющих факторов представляется довольно сложным и трудоемким процессом. Поэтому без применения мощной вычислительной техники и соответствующих программных продуктов провести глубокое и всестороннее исследование режимных параметров (токов, напряжений и мощностей) с учетом целого комплекса влияющих факторов практически труднореализуемо.

С появлением универсального программного комплекса «Matlab» с приложением к нему пакета «Simulink» у исследователей появилась возможность проведения исследований режимных параметров сети с учетом практически всех обозримых факторов, оказывающих в той или иной степени влияние на интересующие исследователя параметры.

С целью проведения достаточно глубоких и всесторонних исследований влияния вышеуказанных факторов на величину токов и напряжений фаз сети, их симметричных составляющих, а также взаимной ориентации указанных величин на комплексной плоскости, сотрудниками кафедр «Системы электроснабжения» и «Безопасность жизнедеятельности» была создана серия компьютерных моделей электрической сети напряжением 380 В типа TN-C, выполненных воздушными линиями. Модели созданы в программном комплексе «Matlab» с использованием пакета «Simulink». Адекватность работы компьютерной модели подтверждена результатами прямых измерений в реальных опытной сети, построенной на учебном полигоне филиала ОАО «МРСК Урала»-«Челябэнерго».

В реальных сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями, к сборным шинам 0,4 кВ одной трансформаторной подстанции в большинстве случаев подключается несколько линий. Поэтому устройства распознавания аварийных режимов во избежание ложных отключений линий должны обладать селективностью работы. Наиболее простым случаем такой сети, позволяющей в первом приближении решать подобную задачу, является сеть с двумя ВЛ, нагрузки которых сосредоточены в конце каждой из них. На рис. 1 представлена ее компьютерная модель.

Подробное описание компьютерной модели простейшей сети, состоящей из последовательно соединенных трехфазного источника, понижающего трансформатора, неразветвленной воздушной линии с сосредоточенной нагрузкой в конце, приведено в [1]. Там же приведено и детальное описание отдельных блоков компьютерной модели сети, а также методики определения параметров, запрашиваемых этими блоками.

В компьютерную модель сети, представленной на рис. 1, заложены следующие сетевые данные: номинальная мощность трансформатора – 160 кВ·А; обе воздушные линии напряжением 380 В выполнены проводом марки АС сечением 35 мм²; длина каждой ВЛ – 200 м; сопротивление заземляющих устройств ТП составляет 4 Ома, повторных заземлителей нулевого провода – 28 Ом.

Так как значительная часть нагрузок воздушных линий напряжением 380 В являются однофазными, то в нормальных их эксплуатационных режимах часто наблюдается значительная несимметрия нагрузок фаз. Это, как известно, вызывает появление в сети напряжений обратной и нулевой последовательности. Кроме того, при этом наблюдаются и существенные отклонения фазных напряжений и токов в фазах ВЛ от их значений при симметричных нагрузках фаз.

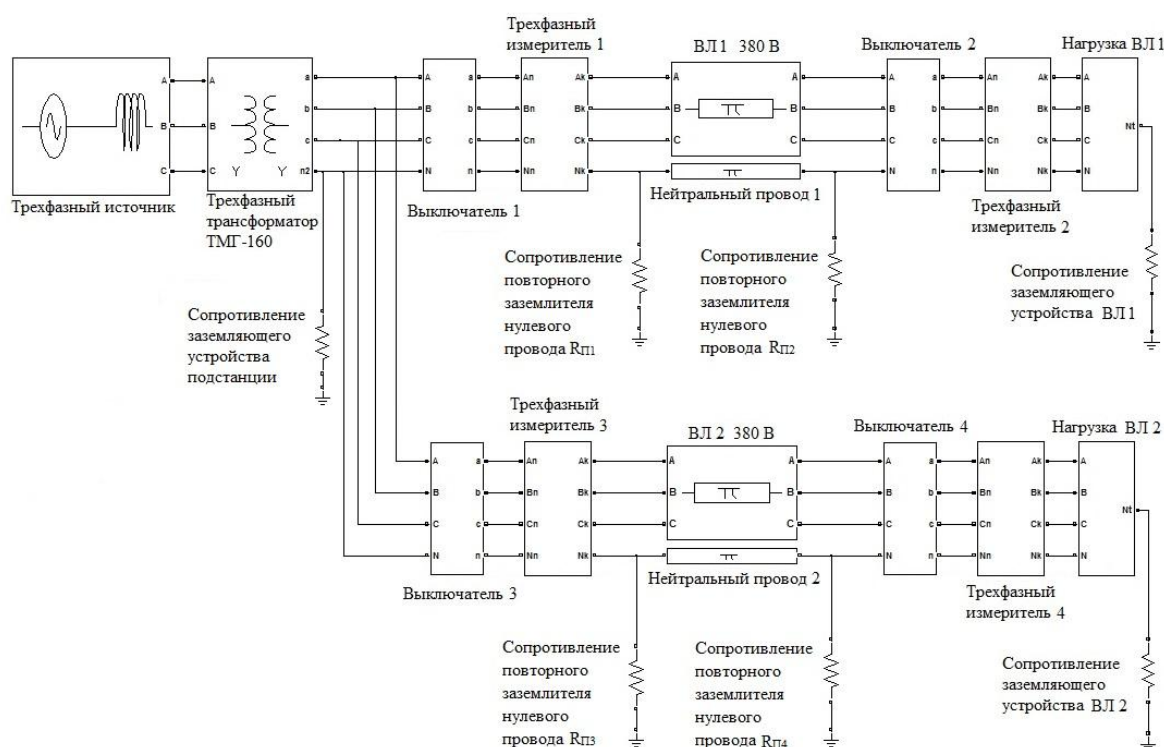


Рис. 1. Компьютерная модель сети с двумя параллельно работающими воздушными линиями напряжением 380 В с сосредоточенными нагрузками в конце каждой из них

Уставки контролируемых режимных параметров, выставляемых в устройствах распознавания аварийных режимов, должны быть отстроены от допустимых их значений в нормальных режимах работы сети. Поэтому, в первую очередь, возникает потребность в определении возможных диапазонов изменения значений контролируемых режимных параметров в нормальных режимах работы сетей. Это, в свою очередь, определяется конкретными значениями сетевых параметров и степенью загрузки фаз трансформатора и отдельно взятой ВЛ напряжением 380 В.

Здесь и далее под нормальными режимами работы сетей будем понимать два их вида:

– отсутствие обрывов проводов как фазных, так и совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего (*PEN*) провода;

– во вводном распределительном устройстве потребителя в одной или двух фазах отключены автоматические выключатели.

На первой стадии исследований несимметрия нагрузок фаз создавалась путем изменения нагрузки одной и двух фаз ВЛ1 при полной симметричной нагрузке фаз ВЛ2 и полной нагрузке третьей фазы ВЛ1, а на второй – одновременным изменением нагрузок одной и двух одноименных фаз обеих линий при полной нагрузке третьей.

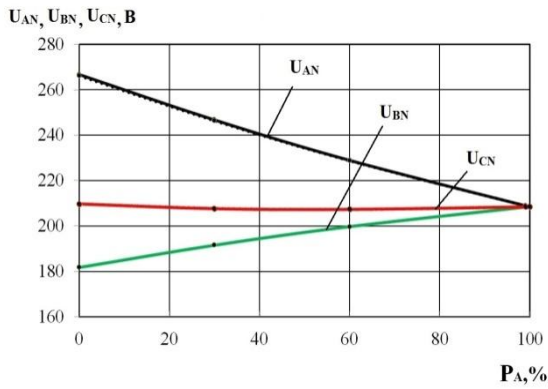
В процессе проведения исследований степень загрузки фаз менялась от 1 до 100 % от расчетной нагрузки фазы $S_{р.ф}$ сначала в фазе А при 100 %-й загрузке двух других, затем в фазах А и В при 100 %-й загрузке фазы С.

С целью выяснения степени влияния характера нагрузки, т.е. $\text{tg}\varphi_{\text{наг}}$, на исследуемые режимные параметры сети (комплексные значения токов, напряжений и их симметричные составляющие) на компьютерной модели были проведены эксперименты при $\text{tg}\varphi_{\text{наг.1}} = 0$ и $\text{tg}\varphi_{\text{наг.2}} = 1$, причем полные мощности в обоих вариантах были приняты одинаковыми. Анализ полученных результатов показал, что характер нагрузки не оказывает существенного влияния на модули напряжений. При одинаковых загрузках фаз и отсутствии обрыва нулевого провода различие в междуфазных напряжениях составило не более 2-х %, в фазных – не более 6,5 %, симметричных составляющих фазных напряжений – не более 2,6 %. При обрыве нулевого провода различия в указанных напряжениях составили еще меньшие величины. Поэтому исследования на компьютерной модели проводились при чисто активной нагрузке фаз, т.е. $S_{р.ф} = P_{р.ф}$.

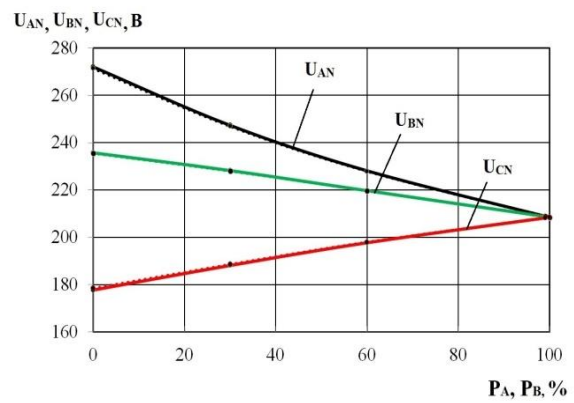
Отключение нагрузок отдельных фаз потребителем в компьютерной модели имитировалось путем создания разрывов связей между «клеммами» соответствующих фаз блоков нагрузки и 3-х фазного измерителя 3 (рис. 1).

Ниже на рис. 2–5 приводятся основные результаты исследований в виде графических зависимостей токов в фазах и напряжений в конце ВЛ и их симметричных составляющих в функции нагрузки одной и двух одноименных фаз обеих ВЛ при условии полной 100 %-ой нагрузке других фаз. Совпадение на этих графиках токов в фазах и напряжений в конце ВЛ, а также их симметричных составляющих в обеих ВЛ объясняется одинаковостью их параметров и нагрузок их одноименных фаз.

Эксперименты, проведенные в режимах работы сети с отключенными автоматическими выключателями в одной и двух фазах вводного устройства потребителя, подключенного в конце ВЛ2, показали, что наибольшие отклонения напряжений в конце ВЛ при изменении степени несимметрии нагрузок фаз ВЛ1 имеют место в режиме работы сети с отключенным автоматическим выключателем в одной фазе. Поэтому на рис. 6–9 представлены аналогичные зависимости, снятые при отключенном положении автоматического выключателя в одной из фаз ВЛ2 и изменении нагрузки в одной и двух фазах ВЛ1 при условии полной 100 %-й нагрузке других фаз воздушных линий.

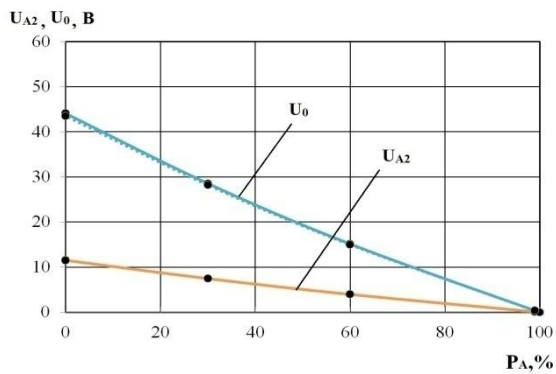


а)

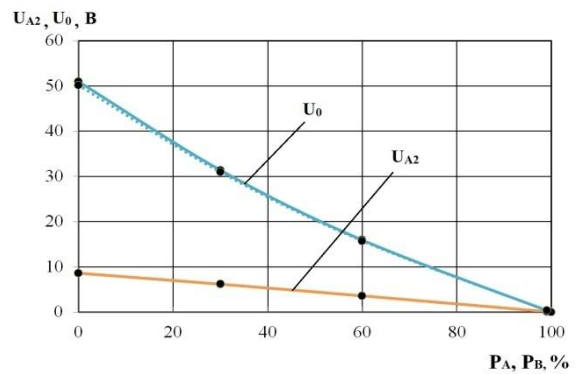


б)

Рис. 2. Напряжения фаз в конце ВЛ1 и ВЛ2 при синхронном изменении нагрузки: а) в фазе А обеих линий; б) в фазах А и В обеих линий

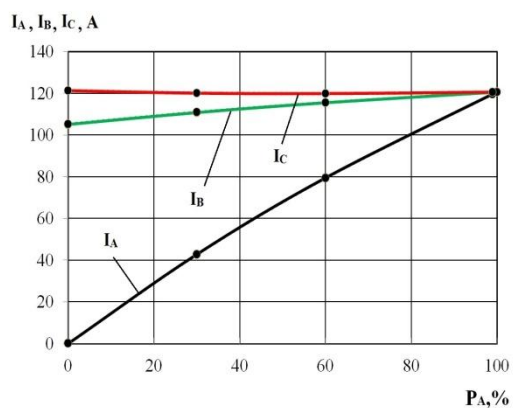


а)

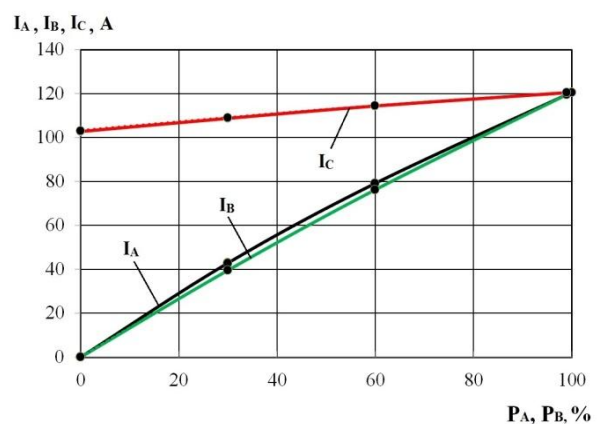


б)

Рис. 3. Напряжения обратной и нулевой последовательностей в конце ВЛ1 и ВЛ2 при синхронном изменении нагрузки: а) в фазе А обеих линий; б) в фазах А и В обеих линий

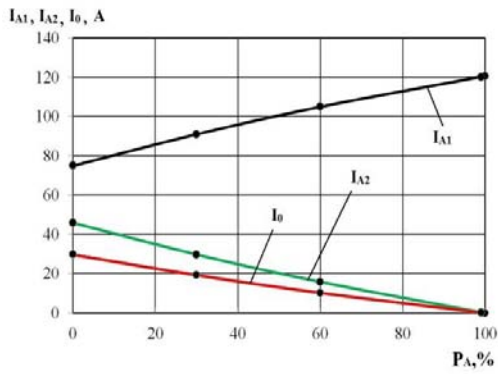


а)

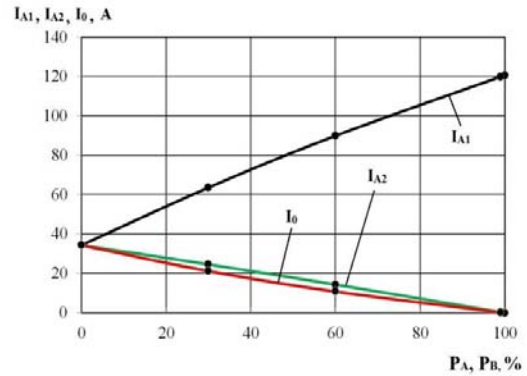


б)

Рис. 4. Фазные токи ВЛ1 и ВЛ2 при синхронном изменении нагрузки: а) в фазе А обеих линий; б) в фазах А и В обеих линий

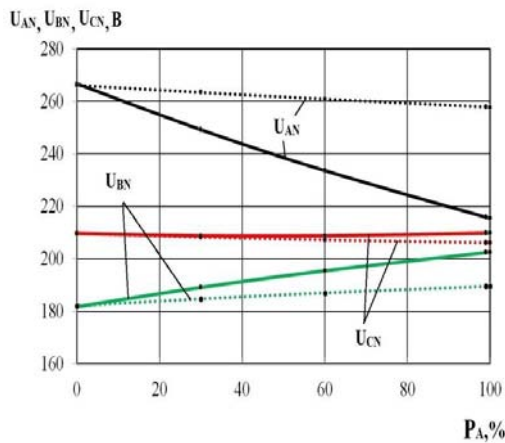


а)

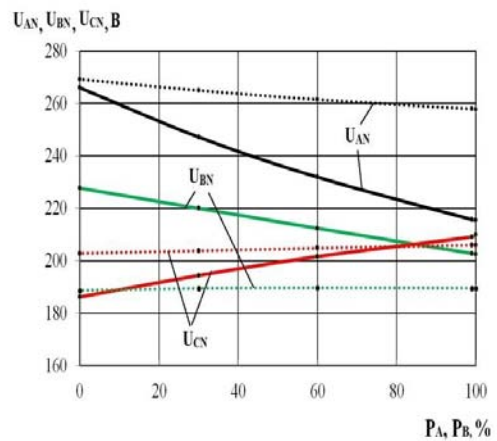


б)

Рис. 5. Симметричные составляющие токов фаз ВЛ1 и ВЛ2 при синхронном изменении нагрузки: а) в фазе А обеих линий; б) в фазах А и В обеих линий

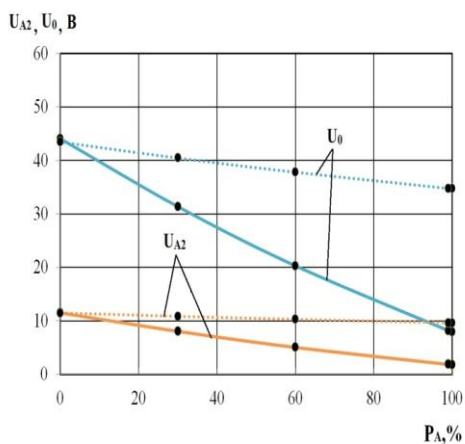


а)

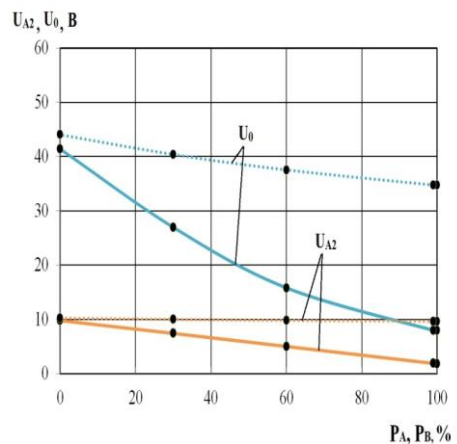


б)

Рис. 6. Напряжения фаз в конце ВЛ1 и ВЛ2 при отключенном автоматическом выключателе в фазе А вводного РУ потребителя, подключенного в конце ВЛ2, и при изменении нагрузки ВЛ1: а) в фазе А; б) в фазах А и В



а)



б)

Рис. 7. Напряжения обратной и нулевой последовательностей в конце ВЛ1 и ВЛ2 при отключенном автоматическом выключателе в фазе А вводного РУ потребителя, подключенного в конце ВЛ2, и при изменении нагрузки ВЛ1: а) в фазе А; б) в фазах А и В

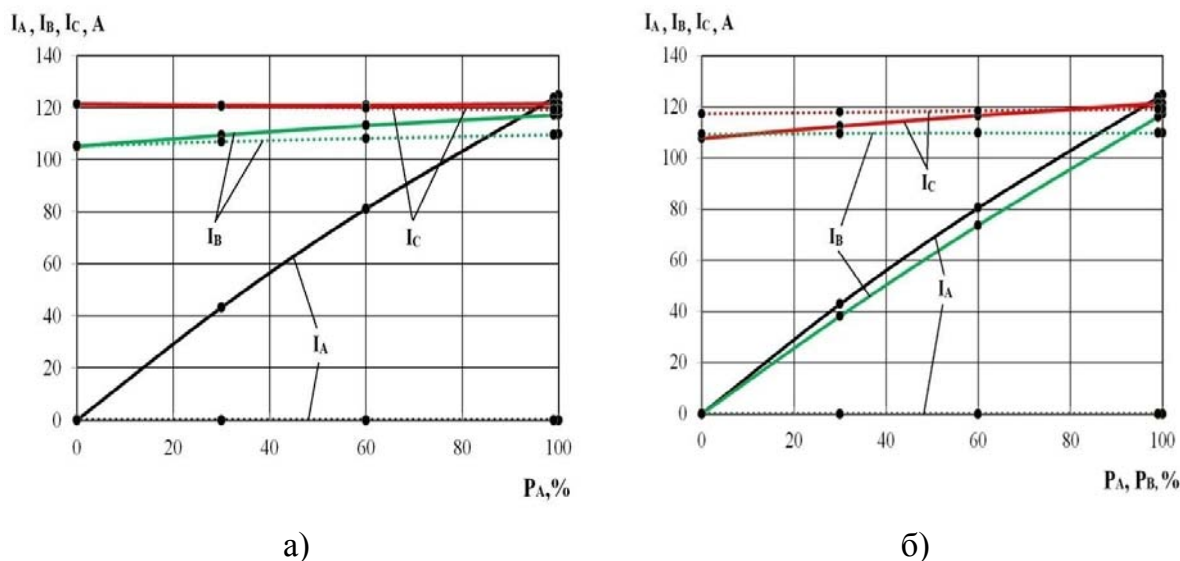


Рис. 8. Фазные токи ВЛ1 и ВЛ2 при отключенном автоматическом выключателе в фазе А вводного РУ потребителя, подключенного в конце ВЛ2, и при изменении нагрузки ВЛ1: а) в фазе А; б) в фазах А и В

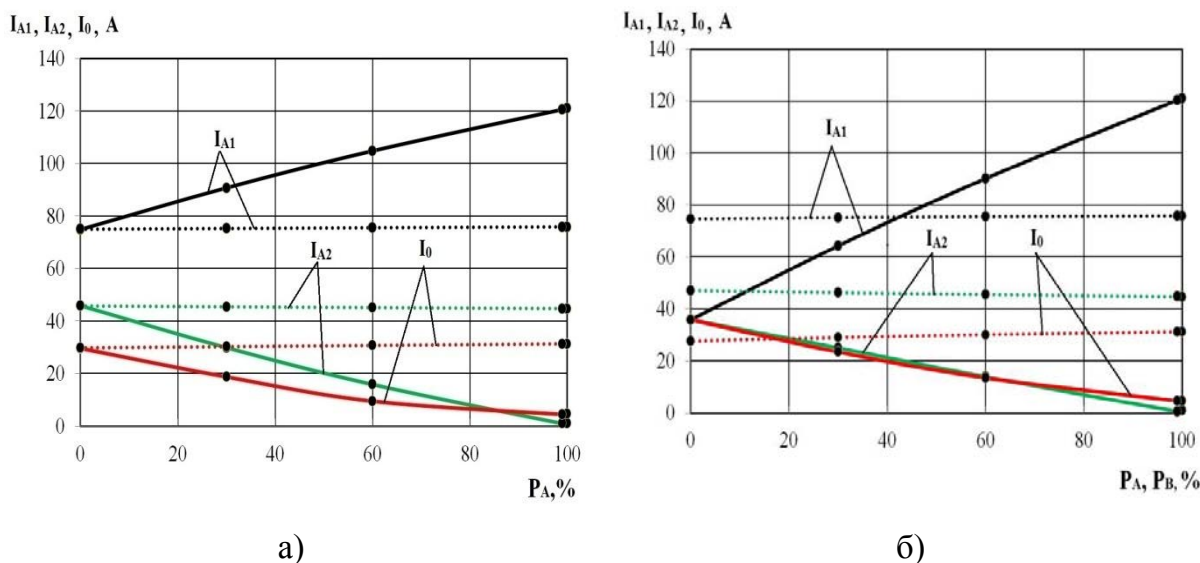


Рис. 9. Симметричные составляющие токов фаз ВЛ1 и ВЛ2 при отключенном автоматическом выключателе в фазе А вводного РУ потребителя, подключенного в конце ВЛ2, и при изменении нагрузки ВЛ1: а) в фазе А; б) в фазах А и В

Отметим, что зависимости, изображенные на рис. 6–9 пунктирными линиями, относятся к ВЛ2, а сплошными – к ВЛ1.

Анализ зависимостей, приведенных на рис., позволяет сделать вывод о том, что при крайних значениях несимметрии нагрузок фаз, обусловленных одновременным изменением их в двух одноименных фазах обеих ВЛ, отклонение токов и напряжений от их же значений в режиме работы с полной нагрузкой всех фаз достигают наибольших значений. Поэтому значе-

ния токов в фазах, напряжений фаз и их симметричных составляющих, зафиксированных при указанных выше режимах, представляют наибольший интерес с точки зрения настройки уставок устройств селективного распознавания возникших в сети аварийных режимов.

Библиографический список

1. Валеев, Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде Matlab-Simulink / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, А.И. Сидоров // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 116–127.