

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
РАДИАЛЬНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В
ПРИ ОБРЫВАХ ФАЗНЫХ И НУЛЕВОГО ПРОВОДОВ**

А.М. ЕРШОВ, Г.С. ВАЛЕЕВ, Р.Г. ВАЛЕЕВ

**Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), г. Челябинск**

В статье приводятся результаты исследований режимов работы электрической сети напряжением 380 В при обрывах нулевого и фазных проводов воздушной линии. Приводится количественная и качественная оценка изменения напряжений электрической сети при разной несимметрии фазных электрических нагрузок потребителей.

Ключевые слова: воздушная линия напряжением 380 В, обрыв нулевого провода, обрыв фазного провода.

Исследованию процессов, происходящих в электрических сетях напряжением 380 В, выполненных воздушными линиями, уделялось и уделяется большое внимание в разные периоды времени становления и развития распределительных сетей указанного напряжения. Значительная часть этих работ была направлена на установление характерных признаков, присущих аварийным режимам, и разработке на их основе средств защиты и повышения уровня электробезопасности.

На распределение фазных напряжений относительно нулевого провода, а также токов, протекающих по линиям электропередачи, оказывают влияние множество факторов, таких как технические параметры понижающих трансформаторов, их внешние характеристики, параметры воздушных линий, величины и места расположения повторных заземлений нулевого провода, сопротивления заземляющих устройств потребителей, степень нагрузки фаз и их несимметрия, наличие параллельно работающих линий, распределение нагрузки вдоль линии и многое другое [1].

Запись уравнений, описывающих состояние сети, с учётом всех указанных выше факторов, и их аналитическое решение представляется довольно сложным и трудоёмким процессом. Нетрудно предположить, что даже при успешном решении такой задачи аналитические выражения для определения напряжений в узлах сети и токов в ветвях получатся громоздкими, включающими в себя большое количество независимых переменных [2]. Использование таких выражений для выявления степени влияния каждого независимого переменного параметра (фактора) на величину и фазу напряжений отдельных фаз сети по отношению к нулевому проводу $\underline{U}_{\phi, N}$, и нулевого провода по отношению к земле $\underline{U}_{N, \text{т}}$, а также и других режимных параметров потребует не меньше усилий и объёма вычислительной работы, чем прямое решение системы уравнений, описывающих состояние сети.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать о том, что без применения мощной вычислительной техники и соответствующих программных продуктов провести глубокое и всестороннее исследование режимных параметров (напряжений, токов и мощностей) с учётом целого комплекса влияющих факторов было весьма затруднительно.

С появлением мощного и универсального программного комплекса «*Matlab*» с приложением к нему пакета «*Simulink*» возникла возможность проведения

исследований режимных параметров сети с учётом 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 и других параметров нами 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*».

Подробное описание компьютерной модели радиальной сети, состоящей из последовательно соединённых трёхфазного источника, понижающего трансформатора, воздушной линии с сосредоточенной нагрузкой в конце, приведено в работах [3, 4, 5], где дано детальное описание отдельных блоков компьютерной модели сети, а также методики определения параметров, запрашиваемых этими блоками [6, 7, 8].

Адекватность работы компьютерных моделей подтверждена результатами прямых измерений в реальных сетях с воздушными линиями напряжением 380 В (ВЛ-380 В) Центрального РЭС ПО «Челябинские городские электрические сети» и Еткульского РЭС ПО «Центральные электрические сети», а также экспериментальными исследования в опытной электрической сети [9, 10, 11, 12, 13]. Следует отметить, что проведение прямых измерений в реальных сетях возможно не во всех эксплуатационных режимах из-за их опасности для оборудования, а в ряде случаев – для людей и животных. При использовании же компьютерных моделей сетей таких ограничений нет, что открывает широкие возможности для исследования поведения режимных параметров сети при независимом изменении нагрузок её отдельных фаз и других факторов, таких как величина сопротивлений заземляющих устройств подстанций $R_{з\text{у.тп}}$, потребителей $R_{з\text{у.п}}$, повторных заземлений нулевого провода $R_{\text{п}}$, обрывы нулевого и фазных проводов как в отдельности, так и совместное, замыкания фазных проводов между собой и каждого из них на нулевой провод, место возникновения в сети указанных видов повреждений, наличие параллельно работающих ВЛ, подключённых к одному трансформатору и т.д.

С целью выявления характерных признаков, свойственных указанным выше видам аварийных режимов работы электрических сетей [1], в общем случае различающихся по своей структуре (топологии), были созданы имитирующие их компьютерные модели, такие как:

- последовательно соединённые трёхфазный источник, понижающий трансформатор, воздушная линия напряжением 380 В с сосредоточенной нагрузкой в конце линии, которую можно изменять пофазно;
- то же с двумя параллельно работающими линиями;
- то же с двумя параллельно работающими линиями, одна из которых магистральная с промежуточным отбором мощности, а вторая – разветвлённая с нагрузками в концах ответвлений, причём нагрузки обеих линий также можно изменять пофазно.

Рассмотренные модели были использованы при компьютерном моделировании различных режимов работы электрической сети [1].

В компьютерных моделях, использованных при исследованиях изменений напряжений в различных режимах работы воздушной линии и несимметрии фазных нагрузок потребителей, приняты параметры обобщенной среднестатистической электрической сети напряжением 380 В (табл. 1).

Таблица 1

Параметры моделируемой сети

Элемент схемы	Параметр	Величина
Трансформатор ТМГ-160/10/0,4	Мощность	160 кВ·А
	Высшее напряжение	10 кВ
	Низшее напряжение	0,4 кВ
Воздушная линия АС-4х35 мм ²	Длина линии	200 м
	Сечение проводов	35 мм ²
	Количество проводов	4 шт.
Сопротивления заземляющих устройств	ТП	4 Ом
	Повторное заземление нулевого провода ВЛ	30 Ом
	Потребителя	0,5–∞ Ом
Предельная (номинальная) активная мощность потребителя $P_{н.макс}$	Одной фазы	28 кВт
	Трёх фаз	72 кВт

Рассмотрим работу ВЛ-380 В при обрыве фазного провода. На рис. 1 в работе [1] пунктирными линиями 1 и 2 обозначены два поперечных сечения ВЛ, между которыми возникает обрыв фазного провода – ОФ. Исследуем следующие сочетания обрывов фазного провода и изменения фазной нагрузки при сопротивлении заземляющего устройства потребителя $R_{з.п} = \infty$ Ом (его отсутствии):

- при обрыве провода фазы *A*, изменении нагрузки в фазе *B* и постоянной нагрузке на фазе *C* – табл. 2;
- при обрыве провода фазы *B*, изменении нагрузки в фазе *A* и постоянной нагрузке на фазе *C* – табл. 3;
- при обрыве провода фазы *C*, изменении нагрузки сначала в одной фазе *A*, а потом одновременно в двух фазах *A* и *B* – табл. 4.

Такое исследование позволит рассмотреть влияние изменения нагрузки на опережающей или отстающей фазе по отношению к фазе, в которой возникает обрыв фазного провода. В первом случае фаза *B* с изменяющейся нагрузкой будет являться отстающей по отношению к фазе *A* с оборванным фазным проводом. Во втором случае фаза *A* с изменяющейся нагрузкой будет являться опережающей по отношению к фазе *B* с оборванным проводом. В третьем случае фаза *A* с изменяющейся нагрузкой будет являться отстающей по отношению к фазе *C* с оборванным проводом.

На рис. 1 и 2 показаны графики изменения напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителя и сопротивления заземляющего устройства потребителя $R_{з.п} = \infty$ Ом.

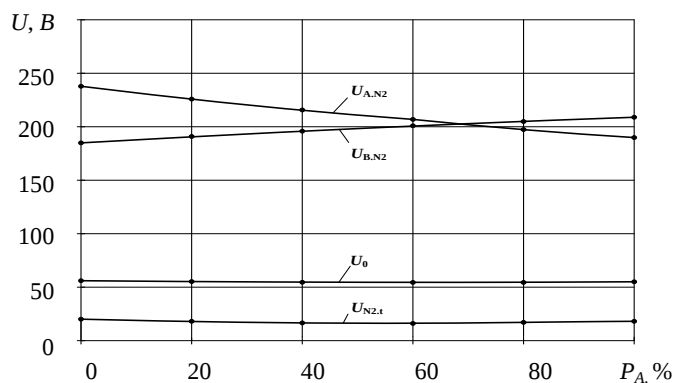


Рис. 1. Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным проводом фазы *C* при изменении нагрузки в фазе *A*, $R_{з.п} = \infty$ Ом

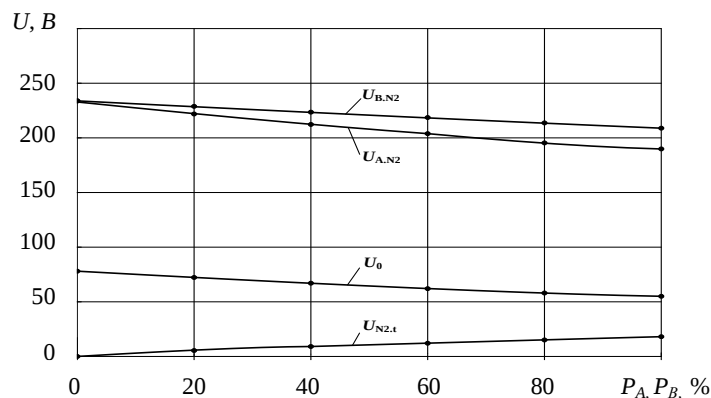


Рис. 2. Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным проводом фазы С при изменении нагрузки в фазах А и В, $R_{3y,\Pi} = \infty$ Ом

Таблица 2

Результаты измерений напряжений электрической сети при обрыве провода фазы А, $R_{3y,\Pi} = \infty$ Ом

Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$		Напряжения у потребителя, В/град										
В	С	$U_{AB,2}$	$U_{BC,2}$	$U_{CA,2}$	$U_{AN,2}$	$U_{BN,2}$	$U_{CN,2}$	Симметричные составляющие			$U_{HC,2}$	$U_{N2,t}$
								$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{0,2}$		
100	100	393,2	364,2	378,5	0	189,4	211,7	133,2	77,29	56,52	169,6	18,31
		26,57	-93,61	150,3		-119,9	109,7	-5,37	179,4	168,1	168,1	-174
80	100	395,3	368,7	378,9	0	197,1	207,9	134,3	78,54	55,95	167,8	17,07
		27,06	-93,6	150,2		-118,7	110,2	-4,44	177,8	172,3	172,3	176,8
60	100	397,6	373,5	379,4	0	205,2	203,6	135,6	80,06	55,5	166,5	16,42
		27,6	-93,55	150,2		-117,5	110,6	-3,42	176,2	177	177	165,5
40	100	399,8	378,6	379,9	0	214	199	136,8	81,88	55,21	165,6	16,64
		28,19	-93,47	150,2		-116,1	111	-2,32	174,6	-177,8	-177,8	152,9
20	100	402,2	384,2	380,5	0	223,4	193,9	138,1	84,05	55,14	165,4	17,93
		28,84	-93,33	150,1		-114,6	111,4	-1,11	173	-172,2	-172,2	140,5
0,001	100	404,5	390,3	381,2	0	233,5	188,2	139,4	86,61	55,35	166	20,33
		29,56	-93,15	150,1		-113	111,8	0,2	171,5	-166	-166	129,7

Таблица 3

Результаты измерений напряжений электрической сети при обрыве провода фазы В, $R_{3y,\Pi} = \infty$ Ом

Нагрузка фаз, % от $P_{H,MAX}$		Напряжения у потребителя, В/град										
А	С	$U_{AB,2}$	$U_{BC,2}$	$U_{CA,2}$	$U_{AN,2}$	$U_{BN,2}$	$U_{CN,2}$	Симметричные составляющие			$U_{HC,2}$	$U_{N2,t}$
								$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{0,2}$		
100	100	378,5	393,2	364,2	211,7	0	189,4	133,2	77,29	56,5	169,6	18,31
		30,28	-93,43	146,4	-10,27		120,1	-5,37	-60,58	48,07	48,07	65,96
80	100	382,7	392,7	367,4	220,2	0	188,5	135,9	76,53	60,65	181,9	17,36
		30,09	-93,37	147	-9,1		118,7	-5,5	-58,6	45,8	45,8	76,64
60	100	387,4	392,2	370,7	229,4	0	187,8	138,9	75,7	65,31	195,9	16,91
		29,91	-93,32	147,6	-7,85		117,2	-5,57	-56,4	43,83	43,83	89,09
40	100	392,6	391,7	374,1	239,2	0	187,5	142,2	74,77	70,53	211,6	17,17
		29,76	-93,26	148,4	-6,48		115,6	-5,59	-54,07	42,18	42,18	102,8
20	100	398,2	391	377,6	249,7	0	187,6	145,7	73,74	76,36	229,1	18,28
		29,64	-93,2	149,2	-5		113,7	-5,54	-51,46	40,87	40,87	116,6
0,001	100	404,5	390,3	381,2	261	0	188,2	149,6	72,59	82,84	248,5	20,33
		29,56	-93,15	150,1	-3,38		111,8	-5,4	-48,57	39,89	39,89	129,7

Таблица 4

Результаты измерений напряжений электрической сети при обрыве провода фазы С, $R_{\Sigma, \Pi} = \infty$ Ом

Нагрузка фаз, % от $P_{H, \text{МАКС}}$		Напряжения у потребителя, В/град										
А	В	$U_{AB,2}$	$U_{BC,2}$	$U_{CA,2}$	$U_{AN,2}$	$U_{BN,2}$	$U_{CN,2}$	Симметричные составляющие			$U_{NC,2}$	$U_{N2,t}$
								$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{0,2}$		
100	100	364,2	378,5	393,2	189,4	211,7	0	133,1	77,29	56,52	169,6	18,31
		26,39	-89,72	146,6	0,105	-130,3		-5,371	59,42	-71,93	-71,93	-54,04
80	100	368,7	378,9	395,3	197,1	207,9	0	134,3	78,54	55,95	167,8	17,07
		26,4	-89,76	147,1	1,165	-129,8		-4,44	57,85	-67,65	-67,65	-63,22
60	100	373,5	379,6	397,6	205,2	203,6	0	135,6	80,06	55,5	166,5	16,42
		26,45	-89,8	147,6	2,521	-129,4		-3,428	56,24	-62,95	-62,95	-74,48
40	100	378,6	379,9	399,8	214	199	0	126,8	81,88	55,21	165,6	16,64
		26,53	-89,85	148,2	3,885	-129		-2,323	54,62	-57,79	-57,79	-87,09
20	100	384,2	380,5	402,2	223,4	193,9	0	138,1	84,05	55,14	165,4	17,93
		26,67	-89,89	148,8	5,37	-128,6		-1,116	53,02	-52,15	-52,15	-99,53
0,001	100	390,3	381,2	404,5	233,5	188,2	0	139,4	86,61	55,35	166	20,33
		26,85	-89,93	149,6	6,991	-128,2		0,2073	52,45	-46,01	-46,01	-110,3
100	100	364,2	378,5	393,2	189,4	211,7	0	133,1	77,29	56,52	169,6	18,31
		26,39	-89,72	146,6	0,105	-130,3		-5,371	59,42	-71,93	-71,93	-54,04
80	80	371,7	383,1	395	196,1	216,3	0	137,1	77,65	59,95	179,9	15,54
		26,97	-89,95	147,1	-0,083	-128,7		-4,586	59,73	-70,18	-70,18	-52,29
60	60	379,5	388	397	203,7	220,9	0	141,3	77,89	63,75	191,3	12,39
		27,58	-90,14	147,7	-0,266	-126,9		-3,72	59,94	-68,19	-68,19	-50,3
40	40	387,5	393,2	399,2	212,3	225,4	0	145,8	78	67,97	203,9	8,81
		28,21	-90,29	148,2	-0,408	-125		-2,755	60,02	-65,94	-65,94	-48,05
20	20	395,8	398,7	401,7	222,2	229,6	0	150,6	77,98	72,66	218	4,708
		28,87	-90,4	148,9	-0,4811	-122,8		-1,67	59,92	-63,38	-63,38	-45,49
0,001	0,001	404,5	404,5	404,5	233,5	233,5	0	155,7	77,84	77,84	233,5	0
		29,56	-90,44	149,6	-0,4389	-120,4		-0,4389	59,56	-60,44	-60,44	-42,55

По результатам анализа этих данных можно сделать следующие выводы:

1. На повреждённой фазе на оборванном проводе со стороны источника питания (поперечное сечение 1) сохраняется фазное напряжение, практически равное напряжению, существовавшему до момента обрыва провода.

Именно оборванный фазный провод со стороны питания представляет особую опасность для людей и животных, которые могут прикоснуться к нему.

2. В той же ситуации, но на оборванном проводе со стороны потребителя (поперечное сечение 2) напряжение относительно нулевого провода становится равным нулю. Однако напряжение на этом оборванном проводе относительно земли t равно напряжению нейтрали потребителя относительно земли $t - U_{N2,b}$, что тоже может представлять опасность для людей, т.к. это напряжение может достигать 20 В и более [14].

3. Поскольку при подключении однофазных электроприёмников по схеме «фаза-нуль» и обрыве фазного провода исчезает соответствующая фазная нагрузка, то исследование влияния несимметрии нагрузок на напряжения сети проводилось как при изменении нагрузки в одной из фаз, остававшейся целой, так и при одновременном изменении нагрузок в двух фазах.

4. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки только в одной фазе от 100 до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

4.1. Изменяется («деформируется») треугольник линейных напряжений $\underline{U}_{AB,2}$,

$\underline{U}_{BC,2}$, $\underline{U}_{CA,2}$, причём разница между ними достигает 10 %.

4.2. При изменении нагрузки в отстающей (по отношению к повреждённой фазе) фазе (например, при оборванном проводе фазы A меняется нагрузка в фазе B , табл. 2, или соответственно в фазах C и A , табл. 3 и 4) напряжение на оборванном проводе относительно нулевого провода со стороны источника питания возрастает со 190,3 до 237,5 В, а на здоровой фазе с неизменной 100%-й нагрузкой соответственно уменьшается с 209,3 до 185,2 В.

4.3. При изменении нагрузки на опережающей фазе, например на фазе A при оборванном проводе фазы B (табл. 3), напряжение на фазе A относительно нулевого провода возрастает с 211,7 до 261 В, а на здоровой фазе с неизменной 100%-й нагрузкой практически остаётся неизменным, находясь на уровне около 190 В.

4.4. Напряжение нулевой последовательности $U_{0,2}$ системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети при изменении нагрузки в опережающей фазе находится приблизительно на одном уровне, примерно равном 55,6–55,9 В. А при изменении нагрузки на отстающей фазе возрастает со значения 56,6 до 82,8 В. Следовательно, при обрыве фазного провода напряжение нулевой последовательности $U_{0,2}$ меняется в пределах 25,2–37,6 % фазного номинального значения.

4.5. Напряжение обратной последовательности U_2 находится на уровне 77–86,4 В.

4.6. Напряжение нулевого провода $N2$ относительно «земли» t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ($R_{3y,п} = \infty$) достигает $U_{N2,t} = 20,3$ В.

5. Для случая обрыва провода фазы C при изменении нагрузки одновременно в двух фазах A и B от 100 до 0 %:

5.1. Треугольник линейных напряжений $\underline{U}_{AB,2}$, $\underline{U}_{BC,2}$, $\underline{U}_{CA,2}$ сначала незначительно «деформируется», а в случае, когда отсутствует нагрузка на двух фазах полностью, – становится снова симметричным.

5.2. С уменьшением фазных нагрузок напряжения в фазах A и B относительно нулевого провода возрастают соответственно с 190 и 212 В до 233,5 В – фактически до холостого режима работы ВЛ-380 В.

5.3. Напряжение нулевой последовательности $U_{0,2}$ системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает со значения 56,9 до 77,8 В и достигает 35,4 % фазного номинального значения.

5.4. Напряжение обратной последовательности U_2 находится на уровне 71,9–77,8 В.

5.5. Напряжение нулевого провода $N2$ относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ($R_{3y,п} = \infty$) со значения $U_{N2,t} = 18,3$ В снижается до нуля.

Как видно из результатов измерений при обрыве фазного провода воздушной линии напряжения 380 В на оборванном фазном проводе относительно нулевого провода со стороны потребителя напряжение практически снижается до нуля. Данный уровень напряжения не зависит от места обрыва фазного провода (в начале или конце ВЛ, или перед потребителем). Напряжение на оборванном фазном проводе зависит от распределения нагрузки по фазам.

Снижение напряжения на оборванном фазном проводе у потребителя практически до нуля является чётким признаком и может служить информацией для выявления данного вида несимметричного режима работы воздушной линии.

Исследования напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода

На рис. 1 в работе [1] пунктирными линиями 1 и 2 обозначены два поперечных сечения ВЛ, между которыми возникает обрыв нулевого провода – ОН. Все повторные заземлители ВЛ находятся до места обрыва нулевого провода.

При моделировании производилось изменение мощности однофазных потребителей. Сначала изменялась активная мощность потребителя, присоединенного на фазу А от 100 до 0 % $P_{Н.МАКС}$ с шагом в 20 %. На втором этапе аналогичным образом одновременно изменялась активная мощность двух потребителей, присоединенных к фазам А и В. Заземляющее устройство потребителя отключено, т.е. $R_{ЗУ.П} = \infty$ Ом.

Результаты исследований параметров электрической сети при обрыве нулевого провода, полученных при компьютерном моделировании, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерений напряжений электрической сети при обрыве нулевого провода, $R_{ЗУ.П} = \infty$ Ом

Нагрузка фаз, % от $P_{Н.МАКС}$			Напряжения у потребителя, В/град										
А	В	С	$U_{AB.2}$	$U_{BC.2}$	$U_{CA.2}$	$U_{AN.2}$	U_{BN}	$U_{CN.2}$	Симметричные составляющие			$U_{НC.2}$	$U_{N2.t}$
									$U_{1,2}$	$U_{2,2}$	$U_{0,2}$		
100	100	100	364,6	364,6	364,6	211	210,5	210,5	210,5	0	0	0	0
			26,33	-93,7	146,3	-3,67	-124	116,3	-3,673	0	0	0	0
80	100	100	369,7	364,6	367,5	229	204,6	203,4	212,1	1,708	15,26	45,77	15,26
			26,28	-93,7	147	-3,27	-120	113,1	-3,467	22,81	-3,265	-3,27	176,7
60	100	100	375,8	364,6	370,9	251	198,3	196,1	213,9	3,742	33,42	100,3	33,42
			26,25	-93,7	147,8	-2,78	-116	108,9	-3,219	23,3	-2,778	-2,78	177,2
40	100	100	383,2	364,6	374,9	277	191,9	189,2	216	6,203	55,4	166,2	55,4
			26,21	-93,7	148,7	-2,19	-110	103,3	-2,912	23,89	-2,189	-2,19	177,8
20	100	100	392,3	364,6	379,9	310	186,1	183,7	218,7	9,242	82,53	247,6	82,53
			26,21	-93,7	149,9	-1,46	-103	96,02	-2,526	24,61	-1,462	-1,46	178,5
0	100	100	403,9	364,6	386,2	351	182,3	182,3	222	13,09	116,9	350,6	116,9
			26,25	-93,7	151,3	-0,54	-93,7	86,33	-122,0	25,53	-0,5411	-0,54	179,5
100	80	80	367,6	372,1	369,6	195,8	222	223,3	213,5	1,492	16,32	48,96	16,32
			146,9	26,9	-93,7	116,5	-6,55	-120	-123,3	83,19	-183,4	-183,5	-3,5
100	60	60	371,7	379,8	375,4	175,4	238	241	216,9	2,729	38,99	117	38,99
			147,6	27,5	-93,5	116,8	-10,3	-115	-122,8	84,1	-183,1	-183,2	-3,2
100	40	40	377,5	387,9	382,3	145,2	264	267,5	220,9	3,459	72,6	217,8	72,6
			148,2	28,13	-93,2	117,3	-15,4	-109	-122,3	85,17	-182,7	-182,7	-2,7
100	20	20	386,9	396,2	391,3	95,68	309	312,5	226	3,104	127,6	382,7	127,6
			148,8	28,78	-92,4	118	-22	-101	-121,6	86,56	-181,7	-181,7	-2,0
100	0	0	404,8	404,8	404,8	0	405	404,8	233,7	0	233,7	701,1	233,7
			149,5	29,46	-90,5	-	-30,5	-90,5	-120,5	-	-180,5	-180,5	-0,5

По данным проведённых исследований построены графики (рис. 3 и 4) изменения напряжений электрической сети в зависимости от различных вариантов несимметрии нагрузок потребителей и при $R_{ЗУ.П} = \infty$ Ом. При анализе графиков можно сделать следующие выводы:

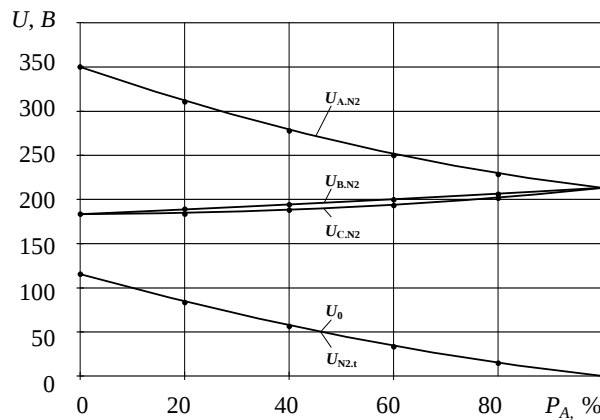


Рис. 3. Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным нулевым проводом при изменении нагрузки в фазе А, $R_{3Y,II} = \infty$ Ом

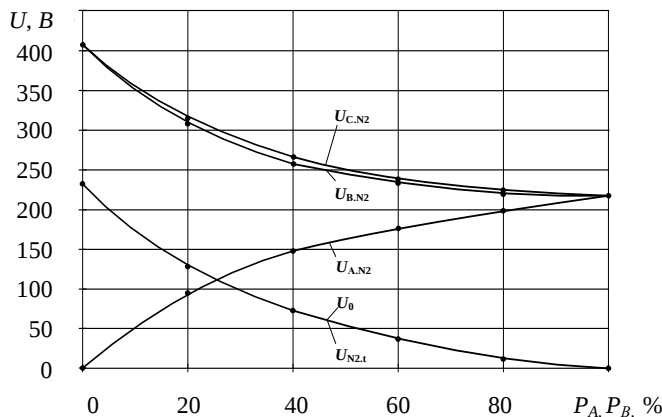


Рис. 4. Графические характеристики напряжений электрической сети с оборванным нулевым проводом при изменении нагрузки в фазах В и С, $R_{3Y,II} = \infty$ Ом

1. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки только в одной фазе А от 100 до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

1.1. Изменяется («деформируется») треугольник линейных напряжений $U_{AB,2}$, $U_{BC,2}$, $U_{CA,2}$, причём разница между ними достигает 10 %.

1.2. Напряжение на фазе А относительно нулевого провода возрастает со значения $U_{A,N2} = 210,5$ до 351 В (при $R_{3Y,II} = \infty$ Ом.), достигая 150 % фазного значения.

1.3. Напряжения на фазах В и С относительно нулевого провода уменьшаются с фазных значений до половины линейного напряжения $U_{BC2} = 364,6$ В, составляя, соответственно, $U_{B,N2} = 182,3$ В и $U_{C,N2} = 182,3$ В или 86,7 % номинального фазного напряжения.

1.4. Напряжение нулевой последовательности $U_{0,2}$ системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает с нуля до 116,9 В, составляя 50 % фазного номинального значения.

1.5. Напряжение обратной последовательности U_2 возрастает с нулевого значения до 25,53 В.

1.6. Напряжение нулевого провода N2 относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ($R_{3Y,II} = \infty$) достигает также значения $U_{N2,t} = 116,9$ В, равняясь напряжению нулевой последовательности U_0 .

2. С увеличением несимметрии при изменении нагрузки одновременно в двух

фазах B и C от 100 до 0 % в конце линии на вводе у потребителя (сечение 2):

2.1. Треугольник линейных напряжений $U_{AB.2}$, $U_{BC.2}$, $U_{CA.2}$ сначала незначительно «деформируется», а при отсутствии нагрузки в двух фазах полностью, становится снова симметричным.

2.2. Напряжения на фазах B и C относительно нулевого провода возрастают с фазного до линейного значения, соответственно составляя до $U_{B.N2} = 405$ В и $U_{C.N2} = 404,8$ В, превышая номинальное значение на 173,2 %.

2.3. Напряжение на фазе A относительно нулевого провода (в нагруженной фазе) снижается с фазного значения $U_{A.N2} = 211$ В до нуля – при подключенной однофазной нагрузке только в фазе A , составляющей 100 % от исходной номинальной.

2.4. Напряжение нулевой последовательности $U_{0.2}$ системы трёхфазных напряжений относительно нулевого провода электрической сети возрастает с нуля до 233,7 В, составляя 100 % фазного номинального значения (фазное напряжение электрической сети на холостом ходу – т.е. при отсутствии нагрузок потребителей) – превышение более 100 % связано с «деформацией» треугольника линейных напряжений при снижении нагрузки на фазе A .

2.5. Напряжение нулевого провода $N2$ относительно земли t при отсутствии заземляющего устройства у потребителя ($R_{3У.П} = \infty$) достигает также значения $U_{N2.t} = 233,7$ В, равняясь напряжению нулевой последовательности U_0 .

Представляет также интерес графическая интерпретация изменения положения нейтральной точки потребителя $N2$ на плоскости треугольника линейных напряжений сети при оборванном нулевом проводе, изменении фазных нагрузок потребителя и при отсутствии сопротивления заземляющего устройства, т.е. при $R_{3У.П} = \infty$. По данным исследований (табл. 5) построен годограф движения потенциала нейтральной точки $N2$ потребителя при обрыве нулевого провода и изменении фазных нагрузок (рис. 5), анализ которого даёт следующие результаты:

1. При симметричной нагрузке потребителя, когда $P_{H.A} = P_{H.B} = P_{H.C} = 100$ %, потенциал нейтрали потребителя $N2$ находится в геометрическом центре треугольника линейных напряжений $\underline{U}_{AB.2}$, $\underline{U}_{BC.2}$, $\underline{U}_{CA.2}$ и совпадает с потенциалом земли t – рис. 5, *а*. Напряжения фаз сети относительно нейтральной точки $N2$ $\underline{U}_{A.N2}$, $\underline{U}_{B.N2}$, $\underline{U}_{C.N2}$ представляют симметричную систему напряжений, т.е. они равны между собой и сдвинуты относительно друг друга на 120 электрических градусов.

2. При уменьшении нагрузки только в одной фазе, например, в фазе A ($P_{H.A} = 80; 60; 40; 20; 0\%$), потенциал нейтральной точки начинает смещаться вниз и при полном отсутствии нагрузки в фазе A попадает на середину линейного напряжения $U_{BC.2}$. При этом напряжение на фазе A относительно нейтральной точки $N2$ увеличивается до значения $U_{A.N2} = 1,5 \cdot U_\Phi$, а напряжения двух других фаз уменьшаются до значения $U_{B.N2} = U_{C.N2} = 0,867 \cdot U_\Phi$, в сумме давая линейное напряжение $U_{BC.2}$ – рис. 5, *б*.

3. При уменьшении нагрузки одновременно в двух фазах, например, в фазах B и C ($P_{H.B} = P_{H.C} = 80; 60; 40; 20; 0\%$), потенциал нейтральной точки $N2$ начинает смещаться вверх и при отсутствии нагрузки в фазах B и C попадает в вершину треугольника линейных напряжений в точку A . При этом напряжение на фазе A относительно нейтральной точки $N2$ становится равным нулю $U_{A.N2} = 0$, а напряжения двух других фаз возрастают до линейного значения и, соответственно, становятся равными $\underline{U}_{B.N2} = -\underline{U}_{AB.2}$ и $\underline{U}_{C.N2} = \underline{U}_{CA.2}$ или $U_{B.N2} = U_{A.N2} = 1,732 \cdot U_\Phi = U_L$ – рис. 5, *в*.

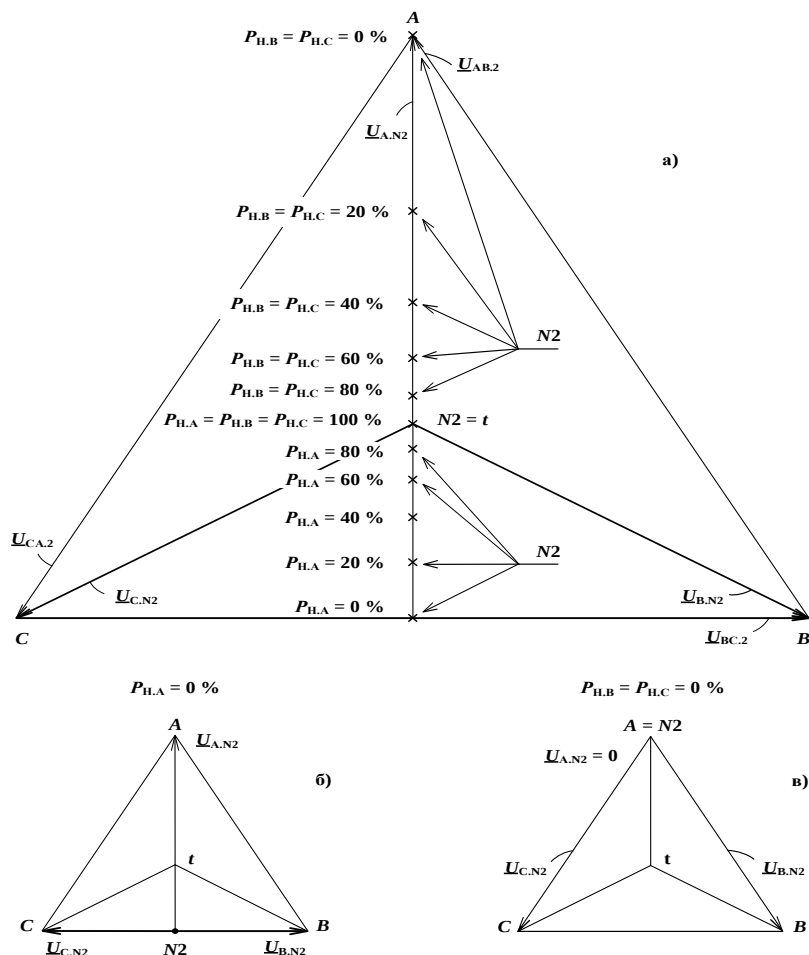


Рис. 5. Годограф движения потенциала нейтральной точки $N2$ потребителя при обрыве нулевого провода и изменении фазных нагрузок

Увеличение фазных напряжений отрицательно влияет на работу питающихся от этих фаз электроприемников, уменьшает срок службы и может привести к их выходу из строя.

Повышение напряжения нейтрали потребителя в первом случае до половины фазного напряжения, а во втором случае – до фазного значения может привести к поражению людей и животных, которые могут коснуться оборванного нулевого провода со стороны потребителя, т.е. отрицательно влияют на условия электробезопасности.

Заключение

1. Проведённые исследования показали, что обрывы нулевого и фазных проводов воздушной линии напряжением 380 В оказывают существенное влияние на изменения фазных и линейных напряжений на зажимах электроприёмников, питающихся по повреждённой линии.

2. Исследования проведены для электрической сети напряжением 380 В, имеющей конкретные параметры. В то же время изменение таких параметров, как мощность силовых трансформаторов, соотношения нагрузок ВЛ с мощностью этих трансформаторов, сопротивлений заземляющих устройств и др., могут давать

несколько иные значения количественных характеристик исследуемых напряжений, но качественные изменения физических процессов при возникновении различных режимах работы электрической сети останутся без изменения.

Summary

The article presents the results of research modes electrical network voltage of 380 V at the breakages neutral and phase conductors overhead line. Quantitative and qualitative assessment of changes in the mains voltage phase unbalance at different electric loads of consumers.

Keywords: breakage neutral conductor, breakage phase conductor.

Литература

1. Ершов А.М. Режимы работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями / А.М. Ершов, Г.С. Валеев, Р.Г. Валеев // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 55-63. С. .
2. Тынянский В.Г. Распознавание режимов работы воздушных линий напряжением 0,4 кВ и электроприёмников: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / В.Г. Тынянский. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. 244 с.
3. 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. 116–128.
4. Валеев Р.Г. Исследование токов и напряжений в различных режимах работы воздушных линий напряжением 380 В на компьютерной модели / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, Г.С. Валеев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. Т.2. С. 149–150.
5. Валеев Р.Г. Компьютерная модель для исследования несимметричных режимов работы воздушных линий напряжением 380 В / Р.Г. Валеев, А.М. Ершов, А.И. Сидоров, А.В. Млоток // Материалы ЛП Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск: ЧГАА, 2013. Ч.V. С. 131–135.
6. Вольдек, А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е перераб. и доп. / А.И. Вольдек. Л.: «Энергия», 1974. 840 с.
7. Круг К.А. Основы электротехники / К.А. Круг. М. Л.: ОНТИ, 1936. 887 с.
8. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформатора: Учебник для вузов / Г.Н. Петров. М.: «Энергия», 1974. 240 с.
9. Валеев Р.Г. Методика проведения экспериментальных исследований параметров воздушных линий электропередачи напряжением 380 В / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров, А.М. Ершов, Е.Л. Шахин // Электробезопасность. 2012. № 2–3. С. 3–10.
10. Валеев Р.Г. Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В при однофазных коротких замыканиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Р.Г. Валеев. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 220 с.
11. Ершов А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 6. С. 18–21.
12. Млоток А.В. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В / А.В. Млоток, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2014. № 2 (19). С. 96–107.
13. Млоток А.В. Обеспечение электробезопасности при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / А.В. Млоток. Челябинск: ЮУрГУ. 2014. 265 с.
14. ГОСТ 12.1.038-82 (2001). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений и токов. Введ. 1983–07–01. М.: Изд-во стандартов, 2001. 5 с.

Поступила в редакцию

01 июля 2016 г.

Ершов Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения" Южно-Уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск. Тел.: 8(351)267-93-18. E-mail: a.m.ershov@mail.ru.

Валеев Галимьян Сабирович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения" Южно-Уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск. Тел.: 8(351)267-93-18, 8(912)322-45-75. E-mail: valeevgs@mail.ru.

Валеев Рустам Галимьянович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения" Южно-Уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск. Тел.: 8(351)267-93-18, 8(912)322-45-75. E-mail: valeevrustam@mail.ru.