

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский и др.; Под ред. Б.Я. Мойжеса и Г.Е. Пикуса. – М.: Наука, 1973. – 480 с.
2. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / И.П. Стаханов, В.П. Пашенко, А.С. Степанов, Ю.К. Гуськов; Под ред. И.П. Стаханова. – М.: Атомиздат, 1973. – 374 с.
3. Зимин В.П. Алгоритм расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя с постоянной температурой электронов / Ред. журн. «Известия вузов. Физика». – Томск, 1984. – № 7. – 36 с. – Деп. в ВИНТИ 21.03.1984, № 1571-84.
4. Norcross D.W., Stone P.M. Recombination, radiate energy loss and level populations in nonequilibrium cesium discharges // J. Quantitative Spectroscopy & Radiate Transfer. – 1968. – V. 8. – № 2. – P. 655–684.
5. Lawless J.L., Lam S.H. An analytical model of thermionic discharges // J. Appl. Phys. – 1986. – V. 59. – № 6. – P. 1875–1889.

Поступила 14.10.2008 г.

УДК 621.39: 621.311.6.0012

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ СИСТЕМЫ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.С. Абрамов, А.М. Сажнев, Д.Н. Левин, В.Б. Малинкин, Л.Г. Рогулина

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск

E-mail: abramov@neic.nsk.su

Разработана имитационная модель нелинейной системы в среде Simulink с учетом внешних воздействий со стороны нагрузки, включающей несимметричную линейную и динамическую нагрузки. Это позволяет оценить степень искажения питающего напряжения и рассчитать сечение нулевого провода с учетом уравнивающего тока, а также проверить на соответствие нормам динамических характеристик системы при работе от промышленной сети.

Ключевые слова:

Имитационная модель, нелинейная система, динамические режимы, несимметричная линейная и динамическая нагрузки, степень искажения питающего напряжения, нормы динамических характеристик системы.

Одной из проблем, возникающей при функционировании сложной нелинейной систем, включающей электропитающее оборудование, является искажение формы напряжения, вызванные гармоническими составляющими тока, потребляемого несимметричной и динамической нагрузками. Несимметрия нагрузки трехфазной сети обусловлена применением однофазных нагрузок, подключаемых к разным фазам. Большая часть компьютерного оборудования, предназначенного для мониторинга промышленного и офисного оборудования, представляет собой динамические нагрузки, что создает помеху в электросеть. Суммарный эффект этих нагрузок выражается в искажении напряжения, которое воздействует на другое оборудование, подключенное к этому же источнику. Это может вызывать сбои в других устройствах, повреждения аппаратуры и другие нежелательные эффекты.

Степень искажения напряжения определяется коэффициентом искажения синусоидальности K_{U_i} , коэффициентами несимметрии напряжения по обратной K_{2U_i} и нулевой последовательности K_{0U_i} [1]. Эффекты, вызываемые высшими гармониками напряжения и тока, делаются на эффекты мгновенного и длительного воздействия. К эффектам мгновенного воздействия относят искажения формы питающего напряжения; падение напряжения в распределительной сети; эффект гармоник, кратных трем (в трехфазных сетях); резонансные явления на

частотах высших гармоник; наводки в оборудовании иных систем и управляющих сетях; повышенный акустический шум в электромагнитном оборудовании; вибрация в электромашинах системах. Проблемы длительного воздействия – это нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах; нагрев конденсаторов и нагрев кабелей распределительной сети.

Высшие гармоники тока, кратные трем (т. е. 3, 9, 15, 21 и т. д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические токи во всех трех фазах сдвинуты на 120° , а сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и напряжения смещения нейтрали. Это утверждение остается справедливым для большинства гармоник. Однако некоторые из них имеют направление вращения вектора тока в ту же сторону, что и основная гармоника (первая, 50 Гц), т. е. имеют прямую последовательность. Другие же вращаются в обратном направлении и, таким образом, имеют обратную последовательность. Это не относится к гармоникам, кратные третьей:

$$n=3(2k+1), \text{ где } k=0, 1, 2, \dots$$

В трехфазных цепях они сдвинуты на 360° , совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные трем, сумми-

руются в нейтрали. В результате в действующем значении фазных токов, общий ток нейтрали может превышать фазные токи:

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

Так, например, при фазных токах равных 37 А ток нейтрали составляет 55 А при частоте, равной 150 Гц [2]. Неправильно спроектированные четырехпроводные кабели трехфазных сетей могут перегреваться вплоть до воспламенения, подтверждая тем самым необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных кабелей сети. Гармоники, кратные третьей, приводят к потерям как в нейтрали, так и в фазных проводниках, вызывая искажения формы напряжения сети.

При наличии высших гармоник в электрических цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами, какими могут считаться блоки, узлы и распределительные сети рассматриваемой сложной системы, возникает опасность появления резонансных явлений. При возникновении резонансного или близкого к нему режима на какой-либо высшей гармонике эта составляющая оказывается больше, чем амплитудное значение первой гармоники на тех же участках цепи. Это отрицательным образом может отразиться на работоспособности отдельных элементов и узлов системы.

Таким образом, при проектировании четырехпроводных линий (TN-C) трехфазных сетей для надежного функционирования системы в динамических режимах требуется их проверка, что возможно только путём моделирования. Наиболее удобной, полной и подходящей для этих целей является интерактивная среда Simulink. Она включает в себя библиотеку блоков, что позволяет моделировать сложные нелинейные системы. Среда состоит из взаимосвязанных компонент – математического, информационного и программно-технического. Каждый из компонент может видоизменяться автономно, независимо от других. Математический компонент включает модели элементов системы, входящих в состав библиотеки Sim Power Systems, которые можно пополнять созданием других моделей устройств. Уравнения связи между элементами, специальные уравнения математической стыковки элементов в случае различных координат переменных, а также алгоритмы управления процессами полной структуры сложной нелинейной системы с любой фиксированной конфигурацией можно создавать посредством математических функций и методов моделирования, имеющихся в подсистеме Simulink [3]. В настоящей работе представлена модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки комплексного типа, позволяющая проводить проверку системы в динамических режимах при схеме заземления типа TN-C.

Модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки

Для проведения измерений в системе при несимметричной и динамической нагрузках разрабо-

тана имитационная модель в среде Simulink, рис. 1. В качестве сети промышленной частоты используется трехфазный источник напряжения (3-Phase Source).

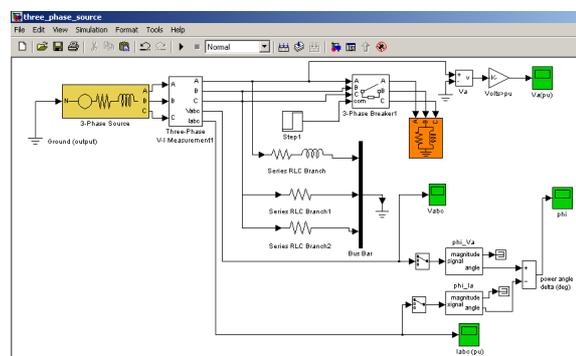


Рис. 1. Модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки комплексного типа

К задаваемым параметрам относятся: действующее значение линейного напряжения, В (Phase-to-phase rms voltage, V); начальная фаза напряжения в фазе А, град (Phase angle of phase A, deg); частота источника, Гц (Frequency, Hz); соединение фаз источника (Internal connection), где значение параметра выбирается из списка: Y – звезда, Yn – звезда с нулевым проводом, Yg – звезда с заземленной нейтралью; задание собственного полного сопротивления источника, используя параметры короткого замыкания (Specify impedance using short-circuit level).

Для измерения токов и напряжений в трехфазных цепях в модели используется трехфазный измеритель (Three – Phase V – I Measurement). К параметрам блока относятся: измерение напряжений (Voltage Measurement); использование метки (Use a label); метка сигнала (Signal label); измерение напряжений в относительных единицах (Voltages in p.u.); измерение токов (Current measurement); использование метки (Use a label); метки сигнала (Signal label); измерение токов в относительных единицах (Currents in p.u.); выходной сигнал (Output signal). Выбор значения параметра возможен только тогда, если с помощью блока Powergui установлен режим расчета на переменном токе (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка: Magnitude – Амплитуда (скалярный сигнал), Complex – Комплексный сигнал, Real-Imag – Вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала, Magnitude-Angle – Вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Выходными сигналами блока являются векторы сигналов измеряемых переменных.

Несимметричная нагрузка имитируется посредством соединения в звезду отдельных элементов с заземлением на общей шине. Задание параметров последовательной RLC-цепи обеспечивается блоком Series RLC Branch. К параметрам блока относятся:

- величина активного сопротивления, Ом (Resistance R, Ohms); индуктивность, Гн (Inductance L, H); емкость, Ф (Capacitance C, F). Для исключения резистора (или индуктивности) из цепи его (ее) величину нужно задать равным нулю, для конденсатора значение емкости нужно задать равной inf. В этом случае на пиктограмме блока элемент отображаться не будет.
- измеряемые переменные (Measurements). Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно контролировать с помощью блока Scope.

Исследование влияния несимметричной и динамической нагрузок на переходные процессы в системе

С помощью разработанной имитационной модели нелинейной системы, рис. 1, проведены расчёты влияния асимметричной нагрузки в фазах на токи и напряжения на выходе, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исследования влияния асимметричной нагрузки

Входные параметры	Асимметрия измеряемых характеристик сети, %		
	Асимметрия нагрузки, %	Тока	Напряжения
Мощность линейной нагрузки $P_n=4$ кВт; мощность динам. нагрузки: активная – $P=200$ Вт, реактивная – $Q_L=200$ ВАр; угол фаз. сдвига $\varphi=29^\circ$	9,09	9,0	0,45
	24,24	14,4	1,11
	28,57	26,4	1,76
	37,50	35,8	2,30
	44,44	40,9	2,44
	50,00	46,5	2,63
Мощность линейной нагрузки $P_n=1$ кВт; мощность динам. нагрузки: активная – $P=1$ кВт, реактивная – $Q_L=1$ кВАр; угол фаз. сдвига $\varphi=27^\circ$	1,0	0,22	0,008
	2,0	0,4	0,09
	3,0	1,1	0,12

Результаты проведенных исследований показали, что на асимметрию напряжения влияет не только величина асимметрии нагрузки, но и соотношение мощностей линейной и динамической нагрузки и ее характер. Из табл. 1 следует, что при несимметричной нагрузке, равной 30 % и выше, асимметрия напряжения превышает нормируемое значение 2 % в соответствии с [1]. Следовательно, при распределении нагрузки по фазам необходимо учитывать это критическое значение для удовлетворения нормы по асимметрии напряжения.

При выборе сечения нулевого провода необходимо учитывать величину уравнивающего тока, возникающего при асимметрии фаз. Напряжение смещения нейтрали при несимметричной нагрузке приведены в табл. 2.

Измерения были проведены при следующих исходных данных: активная мощность линейной нагрузки $P_n=4$ кВт; номинальное напряжение

$U_n=220$ В; номинальная частота $f_n=50$ Гц; составляющие мощности динамической нагрузки: активная $P=200$ Вт, реактивная $Q_L=200$ Вт. На основании подобных измерений можно рассчитать поперечное сечение нулевого провода, учитывая допустимые значения асимметрии нагрузки в фазах.

Таблица 2. Измерения напряжения смещения нейтрали

Асимметрия нагрузки, %	9,09	24,24	28,57	37,50	44,44	50,00
Напряжение смещения нейтрали, В	5,0	9,6	17,2	23,7	29,1	33,8

Из множества переходных процессов, протекающих в системах, наибольший интерес для практики представляют динамические нагрузки в несимметричных режимах работы. При анализе переходных процессов частоту и уровень напряжения питания принимаем постоянными, т. к. их изменения являются медленными по отношению к времени протекания переходных процессов в сети. Момент коммутации нагрузки задается внешним воздействием на коммутатор посредством генератора ступенчатого сигнала Step, в котором время наступления перепада сигнала равняется 2 с. Расчёты были проведены при следующих данных: активная мощность исходной нагрузки $P_n=4$ кВт; составляющие мощности динамической нагрузки: активная мощность $P=3$ кВт; реактивная мощность $Q_L=3$ кВА. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3. Динамические показатели при несимметричном режиме

Входные параметры			Изменяемые характеристики	
Характер асимметрии нагрузки	Асимметрия тока сети, %	Асимметрия напряжения сети, %	«Наброс» нагрузки, ΔI , %	Время установления, $t_{уст}$, с
Симметрия	0,0	0,0	19,1	4,7
Недогрузка	49,6	1,04	8,36	3,6
Перегрузка	33,3	0,29	22,7	9,6

По данным табл. 3 видно, что к увеличению импульсного значения тока и времени установления переходного процесса приводит только перегрузка одной из фаз. Снижение нагрузки в ней не ухудшает динамику процессов, а приводит к появлению уравнивающего тока. Последнее является причиной перегрузки нулевого провода, что может привести к его разрушению. Значения импульсного тока, табл. 3, не превышают нормируемой величины $6I_{ном}$ длительностью более 1 с при работе на несимметричную и динамическую нагрузки [4]. Исследования показали, что на переходные процессы в большей мере влияет величина перегрузки, а не ее асимметрия.

По результатам проведенных исследований получено семейство зависимостей асимметрии и напряжения смещения нейтрали при различных видах нагрузок для ряда мощностей, рис. 2–5.

Таким образом, имитационная модель нелинейной системы при воздействии со стороны комплекс-

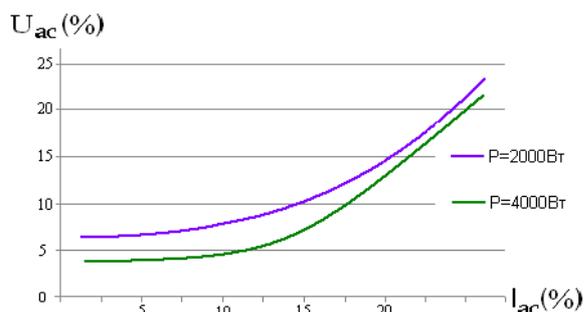


Рис. 2. Зависимость напряжения асимметрии при изменении активной нагрузки

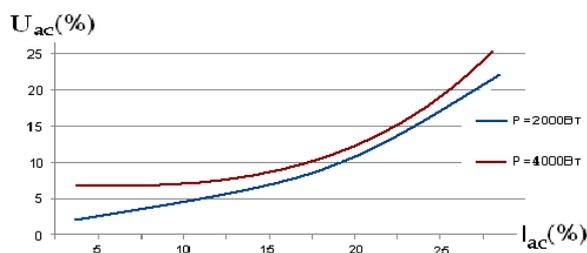


Рис. 3. Зависимость напряжения асимметрии при изменении активно-индуктивной нагрузки

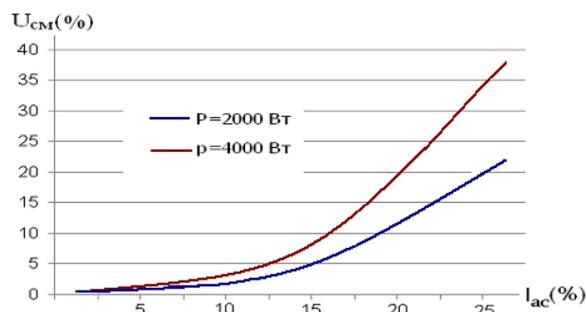


Рис. 4. Зависимость напряжения смещения при изменении активной нагрузки

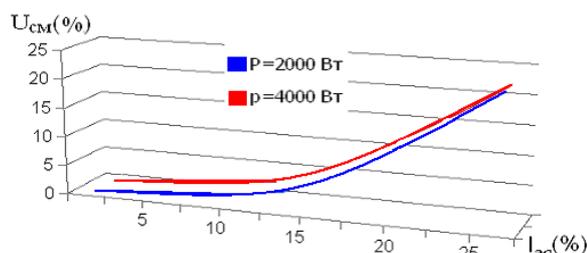


Рис. 5. Зависимость напряжения смещения при изменении активно-индуктивной нагрузки

ной нагрузки (несимметричная статическая и динамическая) позволяет оценить степень асимметрии напряжения и рассчитать сечение нулевого провода по величине уравнительного тока, возникающего при асимметрии нагрузки, а также проверить удовле-

творение нормам динамических параметров системы при работе от промышленной сети в штатном режиме. Результаты моделирования динамических режимов нелинейной системы следует считать неотъемлемой частью синтеза любых сложных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации. – 1997. – № 2. – С. 104–108.

- Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MatLab. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.: ил.
- ОСТ 45.183-2001. Установки электропитания аппаратуры электросвязи стационарные. Общие технические требования.

Поступила 10.07.2008 г.