

Выводы

1. При исследованных способах (быстродействующего и усовершенствованного) прогнозирующего релейно-векторного управления время отработки активной проекции статорного тока не является неизменной величиной, а зависит от абсолютной величины и полярности обрабатываемого значения указанной проекции, а также – от текущего значения скорости двигателя. При этом с увеличением скорости двигателя время отработки положительной активной проекции статорного тока – увеличивается, а при отрицательной проекции – уменьшается. Для скорости двигателя равной нулю, время отработки положительной и отрицательной активной проекции статорного тока – одинаково.

2. Установлено, что усовершенствованное релейно-векторное регулирование статорного тока в ЧРАЭП с УДНПЧ характеризуется в переходных режимах быстродействием, примерно равным предельному, а частотой переключения силовых ключей в установившихся режимах – примерно в (1,1–7,6) раз меньше, чем при быстродействующем быстродействии. Это позволяет при усовершенствованном управлении уменьшить модуляционные потери мощности в инверторе и двигателе рассматриваемого электропривода.

3. Электромагнитные процессы отработки статорного тока при быстродействующем и усовершенствованном релейно-векторном регулировании, рассчитанные без учета сетевого фильтра и с учетом сетевого фильтра из [6], примерно между собой равнозначны (отличие не превышает 5–7 %).

Перечень ссылок

1. Ziogas P. D., Kang Y., Stefanovic V. R. Rectifier-Inverter Frequency Changers with Suppressed DC-Link Component // IEEE Trans. on Industry Application. – 1986. – Vol. 22, Is. 6. – P. 1027–1036.
2. Волков А. В., Антонов Н. Л. Быстродействующее векторное регулирование статорного тока в асинхронных электроприводах с двухзвенным непосредственным преобразователем частоты // Электромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка. – 2004. – Вип. 62. – С. 21–24.
3. Ziogas P. D., Kang Y., Rashid M. H. Analysis and design of forced commutated cycloconverter structures with improved transfer characteristics // IEEE Trans. on Industry Electronics. – 1986. – Vol. 33, Is. 3. – P. 271–280.
4. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Мухаматшин И. А. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями частоты в системах электроснабжения и электропривода // Электроприводы переменного тока: Труды международной тринадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2005. – С. 137–140.
5. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Современные частотно-регулируемые асинхронные приводы с широтно-импульсной модуляцией. – Дніпропетровськ: НГУ, 2006. – 470 с.
6. Волков А. В., Антонов Н. Л. Цифровая модель непосредственного преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией, нагруженного на асинхронный двигатель // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 67–71.

Поступила в редакцию 24.06.08 г.

Запропоновано вдосконалити прогнозування релейно-векторне регулювання статорного струму для асинхронного електропривода зі спрощеним двоанковим безпосереднім перетворювачем частоти, для якого методом імітаційного моделювання проведено дослідження швидкодії відпрацювання статорного струму та виконано дослідження з оптимальним за швидкодією регулюванням.

The advanced predicting relay-vector regulation a current of stator for the asynchronous electric drive with simplified two-section direct frequency converter for which by a method of imitating modeling it is carried out research of speed of step change a current of stator is offered and comparison with optimum regulation on speed is executed.

УДК 621.315.2: 004.942

С. М. Тиховод, И. О. Афанасьева, Т. М. Корнус, Н. В. Скрыпичин

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ANSYS

Предложена уточненная методика расчета с помощью системы ANSYS первичных и вторичных параметров кабелей связи по заданным конструктивным параметрам кабеля и свойствам материалов. Приведен пример расчета коэффициента затухания кабеля ЗКП в диапазоне частот до 250 кГц.

Приближенный расчет электрических параметров симметричных кабелей связи приводится во многих известных учебниках, в том числе в работах [1–3].

© С. М. Тиховод, И. О. Афанасьева, Т. М. Корнус, Н. В. Скрыпичин 2008 г.

В этих работах при вычислении аналитическими методами активного сопротивления и внутренней индуктивности рабочей пары кабеля делается допущение,

что линии магнитного поля, создаваемые каждым проводником, концентричны. На самом деле на высоких частотах проявляется поверхностный эффект и эффект близости (закрывающийся в повышении плотности тока на внутренних поверхностях проводника рабочей пары по сравнению с внешними поверхностями), что приводит к искажению концентричности линий поля и появлению погрешности вычислений. По сравнению с методикой расчета однопарных кабелей, методика расчета многопарных кабелей менее точна. В связи с этим в работе [1] для уточнения расчетов многопарных кабелей введен ряд коэффициентов, определенных опытным путем для разных типов таких кабелей, что усложняет на практике проектирование новых изделий. Поэтому разработка универсальной методики для расчета параметров кабелей связи сложной конструкции является актуальной задачей.

В работе [4] изложен новый подход к решению данной проблемы. Этот подход заключается в том, что с помощью системы конечноэлементного моделирования полей ANSYS предварительно рассчитывается и строится картина магнитного поля, создаваемого проводниками кабеля, а также картина распределения плотности тока в проводниках. При этом учитываются как проводники рабочей пары, так и проводники нерабочих пар и экрана. На частотах выше 20 кГц явно проявляется поверхностный эффект и эффект близости.

Целью данной статьи является разработка уточненной методики расчета электрических параметров кабелей связи сложной конструкции (на примере одночетверочного экранированного кабеля ЗКП), которая учитывает конструктивные параметры кабеля и применяемые в нем материалы.

Основными потребительскими параметрами кабелей связи являются первичные погонные параметры: активное сопротивление R , индуктивность L , емкость C и активная проводимость изоляции G , приходящиеся на единицу длины кабеля (1 км). С помощью первичных параметров могут быть рассчитаны вторичные параметры: коэффициент затухания α , коэффициент фазы β и волновое сопротивление Z_0 :

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{(R + j\omega \cdot L) / (G + j\omega \cdot C)}; \\ \gamma &= \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega \cdot L) \cdot (G + j\omega \cdot C)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рассчитаем эти параметры в рабочем диапазоне частот до 250 кГц, исходя из конструктивных размеров кабеля и свойств материалов.

Конструктивные размеры кабеля ЗКП приведены в табл. 1., а геометрическая двумерная модель кабеля – на рис. 1.

Для удобства моделирования (с учетом симметрии) рассмотрена половина кабеля. Двумерная модель предполагает, что параметры модели неизменны по оси Z (то есть, что все проводники кабеля параллельны). Обычно пары и четверки кабелей скручивают и эффект скрутки учитывают введением коэффициента скрутки $\chi = 1,02 - 1,07$. Для моделирования магнитных полей кабеля данной конструкции разработана ANSYS-программа, приведенная в [4].

Таблица 1

Наименование параметра	Размер, мм
диаметр медной жилы	1,20
толщина изоляции	1,05
диаметр изолированной жилы	3,3
диаметр полиэтиленового корделя в центре	1,3
диаметр четверки	8,0
шаг скрутки	116,0
поясная изоляция (заполнение):	
– толщина заполнения	1,85
– диаметр по заполнению	11,65
экран из алюминиевой ленты:	
– толщина ленты	0,1
– диаметр по экрану	11,95
обмотка лавсановой лентой:	
– толщина ленты	0,025
– диаметр по ленте	12,0
поливка битумной массой:	
– толщина	0,3
– диаметр по битуму	12,6
оболочка из полиэтилена:	
– толщина	2,3
– диаметр по оболочке	17,20

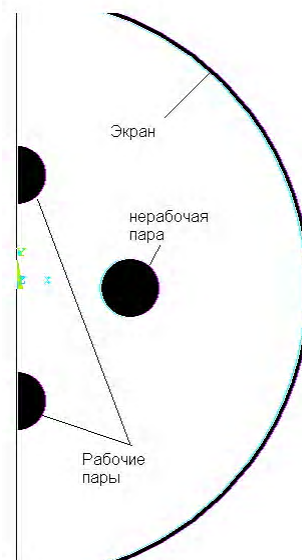
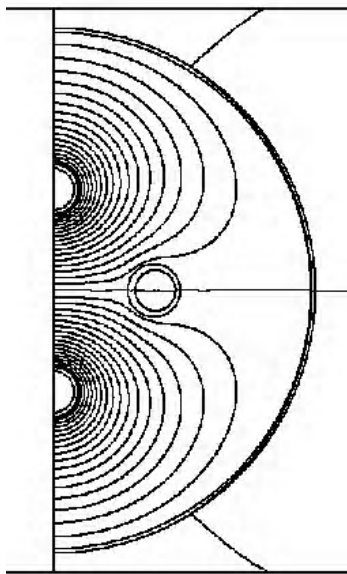


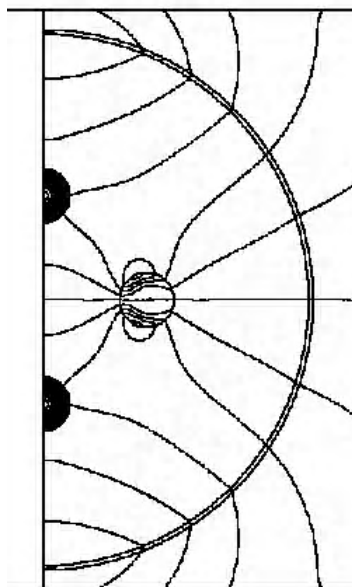
Рис. 1. Геометрическая двумерная модель половины кабеля

При использовании ANSYS-программы гармонического анализа из [4], рассчитаны картины распределения магнитных полей при заданном токе в рабочих жилах, равном 1 А. Гармонический анализ проводится в комплексной форме. На рис. 2 представлены рассчитанные картины распределения магнитного поля для реальной и мнимой составляющих.

Исходя из полученных картин распределения напряженности магнитного поля и плотности тока, вычислим первичные параметры кабеля R и L . Для этого вычислим вектор Пойтинга на поверхности всех проводников, направленный по нормали к поверхно-



а)



б)

Рис. 2. Картины линий распределения магнитного поля:
а) реальная часть; б) мнимая часть

сти проводников, и рассчитаем комплексную потребляемую мощность. Приведем фрагмент программы, который из рассчитанного массива распределения полей выбирает мнимые части H_φ, J_Z на поверхности нерабочей жилы:

! Определение локальной цилиндрической системы координат

! с центром, совпадающим с центром жилы первой – нерабочей пары.

local,11,1,A/2,0,0

!Установка работа с Im частями полученных комплексных результатов.

SET,1,1,,1

! Задана локальная цилиндрическая система координат.

CSYS,11

!Цикл прохождения точек на поверхности проводника по одному градусу.

*do,kk,1,360

! Определение номеров узлов и сохранение их в массиве Ng.

Ng(1,kk)=node(D/2,1*(kk-1),0)

! Выбор значений H_x на поверхности проводника.

*get,Hxlm,node,Ng(1,kk),H,X

! Выбор значений H_y на поверхности проводника.

*get,Hylm,node,Ng(1,kk),H,Y

! Вычисление H_{fi} на поверхности проводника.

Hfilm(1,kk)=-Hxlm*sin((kk-1)*deg)+Hylm*cos((kk-1)*deg)

Nge(1,kk)=node(D/2-TEK/2.5,1*(kk-1),0)

! Определение номеров элементов на поверхности проводника.

Ne(1,kk)=ENEXTN(Nge(1,kk),1)

! Выбор значений плотности тока на поверхности.

*get,Jlm(1,kk),elem,Ne(1,kk),JT,Z

*enddo ! Конец цикла.

Аналогично выбираются реальные части H_φ, J_Z на поверхности рассмотренной жилы. Точно так же выбираем значения реальных и мнимых частей на поверхности рабочей жилы и экрана. Z-компонента напряженности электрического поля вычисляется, исходя из плотности тока на поверхности проводника [1]:

$$E_Z = \sigma \cdot J_Z, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость проводника.

В результате получаем массивы реальных и мнимых частей H_φ, E_Z и суммарный поток Π вектора Пойтинга, поглощаемый проводниками [1]:

$$\Pi = \oint_S \dot{E}_Z \bar{H}_\varphi dS, \quad (3)$$

где \bar{H}_φ – комплексно-сопряженное значение φ -ой составляющей напряженности магнитного поля.

С другой стороны, эта же мощность может быть определена в виде [1]:

$$\Pi = (R + j\omega L_i) I^2, \quad (4)$$

где R – эквивалентное активное сопротивление рабочей пары;

L_i – эквивалентная внутренняя индуктивность рабочей пары;

I – значение полного тока пары.

Полная эквивалентная индуктивность рабочей пары равна сумме внутренней индуктивности L_i и внешней индуктивности L_e . Внешняя индуктивность равна отношению магнитного потока, пересекающего диэлектрик между проводниками пары, к току пары [1]:

$$L_e = \frac{\int B_x dS}{I}. \quad (5)$$

Далее приводится фрагмент программы вычисления магнитного потока по поверхности между рабочими проводниками:

```

CSYS,0 ! Работа в Декартовой системе координат.
! Работа с Re частями полученных комплексных
результатов.
SET,1
NC1=node(0,A/2-D/2,0) !номер узла верхней жилы
NC2=node(0,-A/2+D/2,0) !номер узла нижней жилы
!параметры пути: M_G- имя пути, 2- количество точек
пути
PATH,M_G,2
PPATH,1,NC1 ! точка номер 1 пути соответствует
узлу номер NC1
PPATH,2,NC2 ! точка номер 2 пути соответствует
узлу номер NC2
PDEF,,B,X,AVG !перенос результатов расчета B
!в направлении X на кривую.
PLPATH,BX ! построение графика Re Bx вдоль кривой
PCALC,INTG,RE_F,BX,S ! интеграл Bx по кривой
На рис. 3 приведен график распределения x-ком-
поненты магнитной индукции Bx между проводника-
ми пары.
    
```

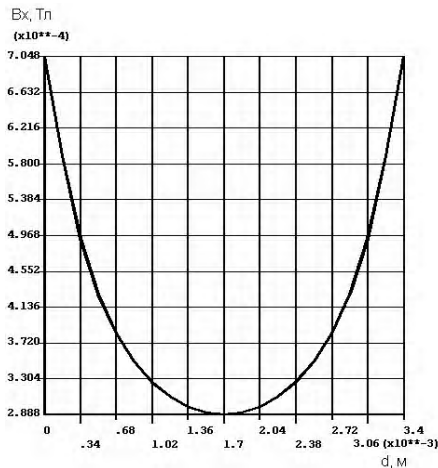


Рис. 3. Распределение магнитной индукции между проводниками рабочей пары

Вычисление емкости и проводимости утечки изоляции выполнено по методике, описанной в работе [4]. Рассчитанное значение емкости, которое остается постоянной величиной, не зависящей от частоты, равно 35 нФ, что соответствует действующим техническим условиям на кабель. Коэффициент затухания вычислим с учетом (1) и преобразований из [1] к сле-

дующему виду:

$$\alpha = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \cdot 8,69, \text{ дБ/км.} \quad (6)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения первичных параметров кабеля ЗКП в диапазоне частот до 250 кГц, а также представлены экспериментальные значения коэффициента затухания, полученные от ЗАО ПП «Азовкабель».

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные значения параметров кабеля ЗКП

Частота, кГц	$L_i \cdot 10^4$, Гн/км	$L_e \cdot 10^4$, Гн/км	R, Ом/км	$G \cdot 10^6$, См/км	α, дБ/км		
					Эксперимент	расчет	Погрешность, %
50*10 ⁻³	1.44	7.5	32.03	3.3*10 ⁻³		0.87	
10	1.19	7.25	35.77	0.66	0.952	0.995	4.5
20	0.936	7.0	40.29	1.3	1.064	1.16	0.4
30	0.797	6.89	43.63	1.98	1.168	1.28	9.6
50	0.644	6.80	49.34	3.3	1.358	1.47	0.4
100	0.424	6.75	61.38	8.8	1.782	1.863	4.5
150	0.304	6.74	69.89	13.2	2.145	2.149	0.2
200	0.232	6.73	76.17	35.0	2.456	2.367	3.6
250	0.187	6.73	81.17	55.0	2.727	2.461	9.7

Выводы

Разработанная уточненная методика расчета первичных и вторичных параметров кабелей связи, основанная на расчетах в среде ANSYS, учитывает основные конструктивные параметры кабелей и свойства применяемых материалов. Как следует из данных табл. 2, относительное расхождение между вычисленными значениями коэффициента затухания для кабеля ЗКП и экспериментальными значениями этого коэффициента в диапазоне частот до 250 кГц не превышает ± 10%.

Перечень ссылок

1. Гроднев И. И., Курбатов Н. Д. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1995. – 488 с.
2. Гроднев И. И. Кабели связи. – М.: Энергия, 1976. – 272 с.
3. Кулешов В. Н. Теория кабелей связи. – М.: Связь-издат, 1950. – 420 с.
4. Денисенко В. Г., Малышев Л. Н., Скрыпичин Н. В., Тиховод С. М. Анализ электромагнитных гармонических процессов в кабелях с помощью системы ANSYS // Электротехника та електроенергетика. – 2006. – № 2. – С. 33–37.

Поступила в редакцию 26.06.08 г.

Запропонована методика розрахунку за допомогою системи ANSYS первинних і вторинних параметрів кабелів зв'язку по заданих конструктивних параметрах кабелю і властивостях матеріалів. Приведений приклад розрахунку коефіцієнта загасання кабелю ЗКП в діапазоні частот до 250 кГц.

Calculation by the help of ANSYS system of primary and secondary parameters of communication cables accord to the given cable designing parameters and materials properties is offered. The example of calculation of damping factor of ZCP cable is adduced over the range of frequency up to 250 kHz.