

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗАДАНИЙ СЛЕДЯЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

С.П. Лохов, Д.Н. Кравец, А.П. Сивкова
г. Челябинск, ЮУрГУ

FORMATION OF SIGNALS OF TASKS WITH THE TRACKING FREQUENCY CONVERTER IN ELECTRIC DRIVE

S.P. Lokhov, D.N. Kravets, A.P. Sivkova
Chelyabinsk, SUSU

Доказана неприемлемость формирования сигналов заданий по частоте $\omega(t)$ следящим преобразователям частоты по, казалось бы, «очевидным» формулам $a = \sin(\omega t)$, $b = \sin(\omega t - 2\pi/3)$, $c = \sin(\omega t + 2\pi/3)$. Это видно на диаграммах интегралов сигналов заданий $\int a dt$, которые пропорциональны магнитным индукциям нагрузок (трансформатор, двигатель). Предложено ωt заменить на $\varphi = \int \omega dt$. Далее исследованы три варианта решения $\sin(\varphi)$, $\omega \sin(\varphi)$ и $d\omega/dt \cdot \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi)$.

Ключевые слова: следящий преобразователь частоты, задание, частота, магнитная индукция, трансформатор, двигатель.

Unacceptability of formation of signals of tasks basing on the frequency $\omega(t)$ with the following frequency converter under seeming "obvious" formulas $a = \sin(\omega t)$, $b = \sin(\omega t - 2\pi/3)$, $c = \sin(\omega t + 2\pi/3)$ is proved. It is clearly seen on diagrammes of integrals of signals of tasks $\int a dt$ which are proportional to magnetic inductions of loadings (the transformer, the engine). It is offered to replace ωt with $\varphi = \int \omega dt$. Further three variants of the decision $\sin(\varphi)$, $\omega \sin(\varphi)$ and $d\omega/dt \cdot \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi)$ are investigated.

Keywords: tracking frequency converter, task, frequency, magnetic induction, transformer, engine.

При разработке микропроцессорной системы управления асинхронным двигателем (АД) с фазным ротором нам потребовалась трехфазная симметричная система импульсов переменной частоты с реверсом, для чего мы использовали тригонометрические функции:

$$\begin{aligned} a &= \sin(\omega t), \quad b = \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ c &= \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

и следили за их моментами переходов через нуль. Первые же эксперименты на ЭВМ при линейном (пуск двигателя) и синусоидальном изменении скорости задания $\omega(t)$ указали на ошибочность такого «очевидного» решения. Диаграмма эксперимента при синусоидальном законе изменения задания показана на рис. 1 сверху. Далее справа за пределами экрана частота сигналов все повышается до бесконечности, причем на участках с $\omega=0$ частоты достигают максимальных значений вместо ожидаемых близких к нулю. Из экспериментальной диаграммы видно, что на частоту сигналов a , b , c больше влияет скорость (производная) изменения задания $\omega'(t)$, а не его вели-

чина ω . Потребовалось объяснение физики обнаруженного явления.

Рассмотрим момент времени t_0 где-то в середине процессов (см. рис. 1) после их начала при $t = 0$. В этой точке величину задания обозначим ω_0 , а его производную или наклон ω_0' . Введем новый смещенный по времени аргумент $\tau = t - t_0$. Предположим, что с момента $\tau = 0$ задание продолжит изменяться по линейному закону с указанным наклоном. Тогда формула (1) только для a запишется и преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} a &= \sin[(\omega_0 + \omega_0' \tau)(t_0 + \tau)] = \\ &= \sin[(\omega_0 + \omega_0' t_0) \tau + \omega_0 t_0 + \omega_0' \tau^2]. \end{aligned} \quad (2)$$

Первый член под обозначением синуса в преобразованной формуле назовем «мгновенной частотой» на момент t_0 :

$$\Omega_0 = \omega_0 + \omega_0' t_0. \quad (3)$$

Второй член в правой формуле (2) - постоянный на момент t_0 угол сдвига, а последним членом можно пренебречь из-за малости величины τ^2 . Из формулы (3) видим, что с увеличением времени все больше сказывается величина производной

сигнала задания ω_0' . Это подтверждает и эксперимент на ЭВМ (см. рис. 1), где поведение сигналов соответствует формуле (3), когда все большую роль играет производная задания. Поэтому «очевидные» формулы (1) не применимы для решения поставленной задачи, но физика процессов на рис. 1 сверху стала понятной.

Выход из ситуации нам подсказал использованный в рассуждениях идеальный трехфазный фазовращатель на АД с фазным ротором, в котором поворот фазы определяет угол поворота ротора φ , а не скорость. При постоянной скорости АД ведет себя как идеальный преобразователь частоты. Угол определяется интегралом скорости с точностью до постоянной интегрирования C :

$$\varphi = \int \omega dt + C. \quad (4)$$

Теперь формулы (1) переписутся в другом виде:

$$\begin{aligned} a &= \sin(\varphi), \quad b = \sin(\varphi - 2\pi/3), \\ c &= \sin(\varphi + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (5)$$

При постоянной скорости $\omega = \text{const}$ формулы (5) преобразуются в свой частный случай - в формулы (1). Диаграммы эксперимента на ЭВМ по формулам (4) и (5) приведены на рис. 2.

Так были получены трехфазные частотно-регулируемые аналоговые сигналы (5), моменты переходов через нуль которых определили на фронтах искоемых импульсов. Сразу же возникла вторая более общая задача формирования аналоговых сигналов заданий следящим преобразователям частоты с нагрузкой в виде электромагнитных исполнительных устройств (трансформаторов, двигателей). Мы должны исключить возможность насыщения магнитопроводов этих устройства и обеспечить их перемагничивание по симметричным циклам. Такое требование следует применить и к электрическим машинам, хотя неприятные последствия несимметричного перемагничивания в них значительно ослаблены воздушным зазором. Магнитная индукция в магнитопроводе трансформатора изменяется примерно пропорционально интегралу приложенного к его обмотке напряжения. На рис. 1 и 2 снизу приведены диаграммы интегралов сигналов a, b, c (или индукций в магнитопроводах), обозначенные теми же буквами.

Видим, что никакой электромагнитный аппарат не выдержит таких напряжений, как сигналы по формулам (1) и (5), на своих обмотках.

В частотно-регулируемом приводе переменного тока по сути такая же проблема давно решена подачей на обмотки напряжений, пропорциональных их частоте. Для сигнала a (не будем далее писать формулы со сдвигами для фаз b и c) формула (5) запишется в виде:

$$a = \omega \sin(\varphi). \quad (6)$$

Результаты эксперимента с формулами (4) и (6) приведены на рис. 3.

Здесь интегралы (индукции) оказались смещенными на постоянные величины, которые скомпенсированы выбором ненулевых начальных значений интегралов или постоянных интегрирования C в (4), что видно на левой границе нижнего рис. 3. Теперь мы получили приемлемые значения индукции на нижних диаграммах, но моменты переходов через нуль сигналов на верхних диаграммах отличаются от таковых на рис. 2. Что делать, если мы имеем два приемлемых разных решения исходной задачи?

Продолжим рассуждения. Ничто не мешает нам в приведенных выше формулах заменить синусы на косинусы с тем же результатом. Эксперименты на ЭВМ подтвердили это. Но тогда формулы (6) являются производными от формул (5). Когда надо отделить постоянную или медленно изменяющуюся составляющую в сигнале, надо продифференцировать его! Продолжим дифференцирование, сформируем следующий вид сигналов задания (7) как производные от сигналов (6):

$$a = d\omega/dt \cdot \sin(\varphi) + \omega^2 \cos(\varphi). \quad (7)$$

Полученные на ЭВМ диаграммы сигналов по формулам (4) и (7) показаны на рис. 4.

Мы получили уже третье «инженерно приемлемое» решение первой, дискретной задачи и второе решение следующей, аналоговой. Последние диаграммы на рис. 4 более приятны. Например, в отличие от рис. 3 снизу процессы начинаются и кончаются нулевыми начальными значениями или с размагниченных магнитопроводов. Задавать правильные начальные индукции на рис. 3 снизу - сложная инженерная задача.

Для двух последних предложений (6) и (7) на рис. 5 построены фазовые траектории зависимо-

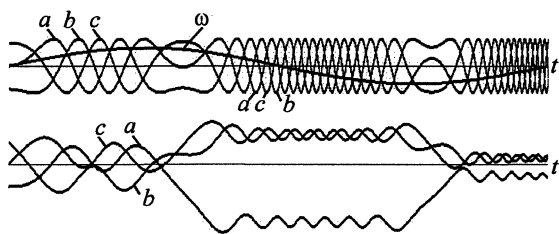


Рис. 1. Сигналы по формулам (1) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении ω

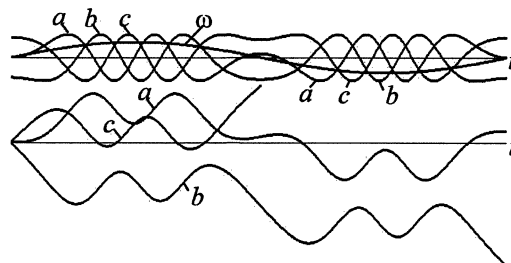


Рис. 2. Сигналы по формулам (4), (5) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении ω

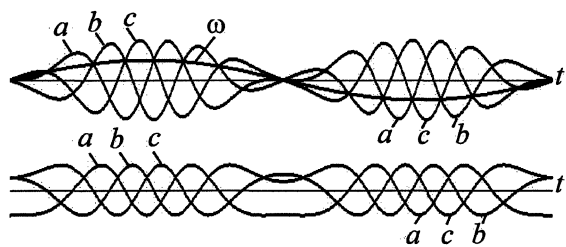


Рис. 3. Сигналы по формулам (4), (6) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении ω

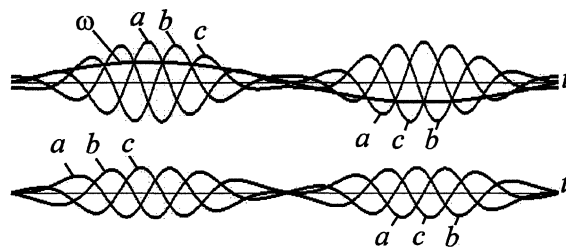


Рис. 4. Сигналы по формулам (4), (7) сверху и их интегралы снизу при синусоидальном изменении ω

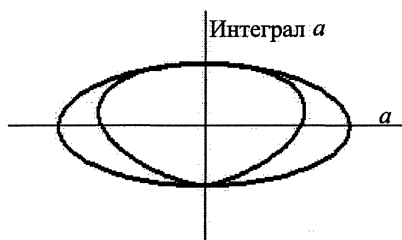


Рис. 5. Фазовые траектории сигналов и их интегралов за первый полупериод изменения ω для рис. 3

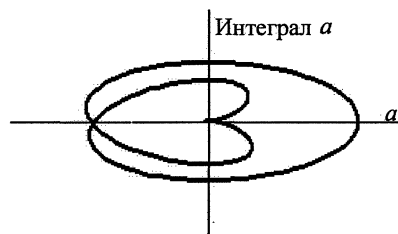


Рис. 6. Фазовые траектории сигналов и их интегралов за первый полупериод изменения ω для рис. 4

стей интегралов сигналов (индукций) от самих сигналов (почти напряженностей). Эти траектории имеют родство с петлями гистерезиса, они характеризуют процессы в магнитопроводах.

И опять фазовые траектории для сигнала по формуле (7) и рис. 4 получились самые приятные для «инженерного взгляда».

Выводы

Сигналы заданий следящим преобразователям частоты можно формировать по формулам (4) - (7), но ни в коем случае по «очевидной» формуле (1). Результаты получились различными, поэтому требуется дополнительный анализ наших «инженерных» предложений.

Поступила в редакцию 11.01.2009 г.

Лохов Сергей Прокопьевич - профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», доктор технических наук. Выпускник ЮУрГУ 1968 года. Научные интересы связаны с теоретическими основами электротехники, силовой электроники, моделированием, численными методами. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

Lokhov Sergey Prokopievich - professor of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University, Doctor of technical science. He graduated from this department in 1968. Scientific interests: theory of electrical engineering, power electronics, simulation, numerical methods. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

Кравец Денис Николаевич - аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Выпускник этой кафедры 2005 года. Научные интересы связаны с программированием. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

Kravets Denis Nikolaevich - post-graduate student of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University. He graduated from this department in 2005. Scientific interests: programming. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.

Сивкова Анна Прокопьевна - ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок. Выпускник ЮУрГУ 1981 года. Научные интересы связаны с силовой электроникой. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-21.

Sivkova Anna Prokopievna - assistant of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations department of South Ural State University. She graduated from this department in 1981 year. Scientific interests: power electronics. Contact phone: 8-(351) 267-93-21.