

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
НА ОСНОВЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

В настоящее время для комплектации СУМП – систем управления машины перегрузочной НПП ВНИИЭМ разрабатывает и поставляет комплектные автоматизированные приводы на основе асинхронных короткозамкнутых двигателей с частотным управлением. Реализация частотного управления осуществляется с помощью статического преобразователя частоты. Преобразователь выпрямляет электропитание промышленной сети, а затем выпрямленное напряжение с помощью мостовой схемы из биполярных транзисторов с изолированным затвором, управляемых микроконтроллером, преобразует в трехфазное переменное напряжение требуемой частоты [1,2].

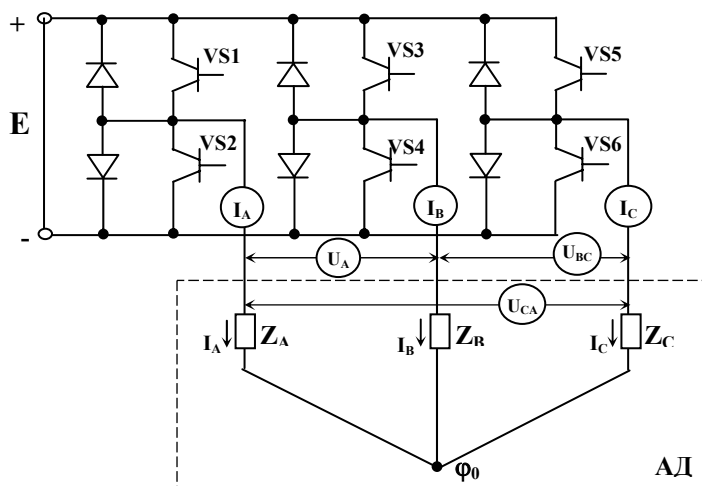


Рис. 1. Принципиальная схема подключения

Схема управления работает по принципу центрированной синусоидальной ШИМ – широтно-импульсной модуляции. Принципиальная схема питания асинхронного двигателя и подключения измерительных датчиков приведена на рис. 1.

Параметры ШИМ формируются микроконтроллером таким образом, чтобы поддерживать выбранный закон управления. Широтно-импульсная модуляция производится на частоте 2400 Гц.

К автоматизированному электроприводу, комплектуемому СУМП, предъявляются повышенные требования, вызванные специфическими выполняемыми функциями: к синусоидальности тока питания, точности поддержания частоты вращения, моменту, потреблению, параметрам пуска и др. Для контроля выполнения этих требований был создан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения параметров привода, включающий в свой состав следующие устройства: испытываемый асинхронный двигатель с преобразователем; датчик частоты вращения двигателя; балансную машину на основе двигателя постоянного тока; устанавливаемый под опору балансной машины датчик силы фирмы KISTLER; устройство по сбору и обработке информации на базе многоканального аналого-цифрового преобразователя АЦП и ПЭВМ со специальным программным обеспечением.

Измерительные устройства стенда имеют следующие особенности, учитывающие специфику электропривода. Асинхронный двигатель и преобразователь частоты включены по схеме звезда без нулевого провода. Преобразователь оснащен тремя датчиками тока (измеряют фазные токи) и тремя датчиками напряжения (измеряют линейные напряжения). Датчики фирмы LEM основаны на использовании эффекта Холла. Датчики тока позволяют производить измерения на частоте до нескольких десятков килогерц. Датчики напряжения имеют несколько пониженную частоту пропускания (до десятка килогерц). Вал двигателя постоянного тока, входящего в состав балансной машины, соединен муфтой с асинхронным двигателем и работает в режиме генератора на омическую нагрузку. Изменением возбуждения машины постоянного тока можно добиваться изменения нагрузки на ее валу и на валу асинхронного двигателя. Момент этой нагрузки можно определить по силе, передаваемой на опору балансной машины, т.е. по показаниям датчика силы. Датчик силы пропускает сигналы до нескольких сотен герц и позволяет производить измерения в динамическом режиме.

Кроме того, непосредственное измерение момента вместо косвенного (по нагрузке на генератор и параметрам машины постоянного тока) позволяет повысить точность измерения. Датчик частоты вращения изготовлен из диска с отверстиями и оптопары.

Импульсный сигнал передается на цифровой вход платы АЦП.

Аналоговые сигналы перечисленных восьми датчиков воспринимаются аналогово-цифровым преобразователем типа ЛА-4 фирмы Руднев-Шиляев, имеющим настраиваемую частоту опроса до 240 кГц. В зависимости от решаемой задачи на этой частоте могут поочередно опрашиваться все каналы, тогда возможно исследовать совместно все параметры электропривода или меньшее число каналов с соответственно большей частотой. Примерные характеристики системы в этих случаях: а) при вращении привода с частотой 50 Гц за один оборот каждый параметр может быть измерен 600 раз, при этом за один период импульса ШИМ напряжение будет измерено в среднем 14,2 раза; б) при измерении только одного линейного напряжения можно получить 100 точек за один период импульса ШИМ.

Обработка информации о показаниях датчиков производилась с помощью разработанных алгоритмов и программ, основной целью которых являлось определение качества электропривода и его соответствие требованиям. Ряд результатов излагается ниже.

Управление преобразователем частоты способом ШИМ применяется для решения задачи изменения частоты и напряжения первой гармоники выходного напряжения и приближения формы кривой фазного тока двигателя к синусоидальной. Применяемый процесс формирования синусоидальной ШИМ [1], реализуемый управляющим микроконтроллером и ключевыми элементами, приведен на рис. 2. Модулирующие синусоидальные сигналы $U_M(t)$ заданной частотой $f_l=1/T_l$ и амплитудой напряжения U_M каждой фазы (A, B, C), сдвинутые друг относительно друга на 120° , формируются микроконтроллером. Там же формируются разворачивающие сигналы пилообразного напряжения $U_P(t)$ с амплитудой U_P и частотой $f_p=2,4$ кГц. Моменты коммутации ключевых элементов соответствуют пересечениям сигналов $U_M(t)$ и $U_P(t)$. Соответствующая фаза (A, B, C) асинхронного двигателя подключается к плюсу напряжения постоянного тока при условии $U_M(t) > U_P(t)$ и эта фаза подключается к минусу напряжения постоянного тока при $U_M(t) < U_P(t)$. В первом случае потенциал фазы относительно средней точки источника питания равен $\varphi_\phi=0,5U_n$, а во втором $\varphi_\phi=-0,5U_n$. Линейные напряжения определяются как разности потенциалов фаз по формулам: $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$, $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$, $U_{CA} = \varphi_C - \varphi_A$. Потенциал средней точки равен $\varphi_0 = 1/3(\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)$.

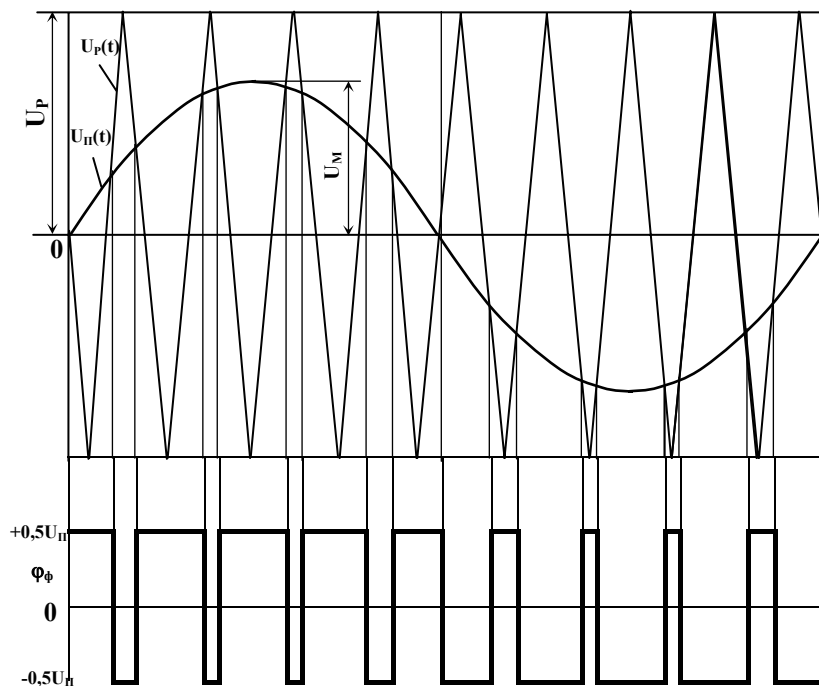


Рис. 2. Процесс формирования синусоидальной ШИМ

Установленные указанным выше (см. рис. 1) способом датчики тока и напряжения позволяют измерить три мгновенных значения фазных токов $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$ и три мгновенных значения линейных напряжений $U_{AB}(t)$, $U_{BC}(t)$, $U_{CA}(t)$ при частоте опроса каждого датчика 40 кГц (измерения по шести каналам). Эти данные использовались для определения характеристик качества питания электродвигателя. Определялся гармонический состав токов и напряжений, а также симметричные составляющие токов и напряжений. Расчеты проводились в следующей последовательности при установившейся частоте вращения.

От единого начала отсчета времени собиралось шесть массивов значений $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$, $U_{AB}(t)$, $U_{BC}(t)$, $U_{CA}(t)$.

Стандартными методами производилось разложение в ряд Фурье с целью определения амплитуд (A_K , B_K , C_K) и фаз (φ_{KA} , φ_{KB} , φ_{KC})

гармонических составляющих токов (I_A, I_B, I_C) в фазах (A_K, φ_{KA}), (B_K, φ_{KB}), (C_K, φ_{KC}), $K=1, 2, \dots$, а также амплитуд (AB_K, BC_K, CA_K) и фаз ($\varphi_{KAB}, \varphi_{KBC}, \varphi_{KCA}$) гармонических составляющих линейных напряжений (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) (AB_K, φ_{KAB}), (BC_K, φ_{KBC}), (CA_K, φ_{KCA}), $K=1, 2, \dots$

В соответствие всем гармоническим составляющим могут быть поставлены комплексные амплитуды токов и напряжений

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{A}_{KI} &= A_{KI} e^{i\varphi_{KA}}, \quad \overset{\circ}{B}_{KI} = B_K e^{i\varphi_{KB}}, \quad \overset{\circ}{C}_{KI} = C_K e^{i\varphi_{KC}}, \quad K=1, 2, \dots; \\ \overset{\circ}{AB}_{KI} &= AB_K e^{i\varphi_{KAB}}, \quad \overset{\circ}{BC}_{KI} = BC_K e^{i\varphi_{KBC}}, \quad \overset{\circ}{CA}_{KI} = CA_K e^{i\varphi_{KCA}}, \quad K=1, 2, \dots, \\ &\text{здесь } i = \sqrt{-1}. \end{aligned}$$

Таким образом, для каждой K -й гармонической составляющей токов и напряжений получена трехфазная система векторов. В общем случае каждая такая система может быть несимметричной (иметь не равные амплитуды и фазы, различающиеся на углы не равные 120°). Каждую несимметричную трехфазную систему можно разложить на три трехфазные симметричные системы: нулевую (с равными амплитудами и фазами), прямую и обратную (с равными амплитудами и фазами, различающимися на 120°). Трехфазной несимметричной системе K -х гармонических составляющих тока можно поставить в соответствие три системы трехфазных симметричных составляющих, комплексные амплитуды которых вычисляются по формулам [3]:

для нулевой последовательности

$$\overset{\circ}{A}_{OK} = \frac{1}{3} \left(\overset{\circ}{A}_{KI} + \overset{\circ}{B}_{OK} + \overset{\circ}{C}_{KI} \right), \quad \overset{\circ}{B}_{OK} = \overset{\circ}{A}_{OK}, \quad \overset{\circ}{C}_{OK} = \overset{\circ}{A}_{OK};$$

для прямой последовательности

$$\overset{\circ}{A}_{1K} = \frac{1}{3} \left(\overset{\circ}{A}_{KI} + a \overset{\circ}{B}_{KI} + a^2 \overset{\circ}{C}_{KI} \right), \quad \overset{\circ}{B}_{1K} = a^2 \overset{\circ}{A}_{1K}, \quad \overset{\circ}{C}_{1K} = a \overset{\circ}{A}_{1K};$$

для обратной последовательности

$$\overset{\circ}{A}_{2K} = \frac{1}{3} \left(\overset{\circ}{A}_{KI} + a^2 \overset{\circ}{B}_{KI} + a \overset{\circ}{C}_{KI} \right), \quad \overset{\circ}{B}_{2K} = a \overset{\circ}{A}_{2K}, \quad \overset{\circ}{C}_{2K} = a^2 \overset{\circ}{A}_{2K},$$

$$\text{здесь } a = e^{i\frac{2}{3}\pi}, \quad a^2 = e^{i\frac{4}{3}\pi}.$$

Аналогичные формулы позволяют вычислить симметричные составляющие линейных напряжений.

Результаты измерений токов и напряжений при частоте вращения 50 Гц и дальнейшие расчеты по приведенным формулам показали, что кроме первой гармоники в напряжении имеют место гармоники с номерами $K=46$, $K=50$, $K=95$, $K=97$, достигающие по амплитуде $25\div 28$ % от первой гармоники. Имеет место некоторая несимметрия в трехфазных системах гармонических составляющих линейных напряжений. Нулевая последовательность отсутствует полностью. Прямую последовательность, кроме первой гармоники, имеют гармонические составляющие с номерами $K=46$, $K=97$, достигающие по амплитуде $25\div 28$ % от первой гармоники. Обратную последовательность имеют гармонические составляющие трехфазной системы с номерами $K=50$, $K=95$, достигающие по амплитуде 28 % от первой гармоники прямой последовательности.

В токах, кроме первой гармоники, также обнаружены гармоники с номерами $K=46$, $K=50$, $K=95$, $K=97$. Однако их амплитуда не превышает 4% от амплитуды первой гармоники. Нулевой последовательности нет. Прямую последовательность образуют гармоники с номерами $K=1$ и $K=46$, обратную – гармоники с номерами $K=1$ и $K=50$.

Пример применения изложенного алгоритма определения симметричных составляющих изложен в табл. 1 - 4.

Некоторые особенности, которые были использованы при выполнении работы, состояли в следующем. Важна длина интервала времени сбора данных, используемых для проведения гармонического анализа. В стационарном режиме работы желательно, чтобы длина интервала сбора данных была равна периоду исследуемых процессов или целому их числу. Иначе ухудшается сходимость ряда Фурье. Если этот период неизвестен, то целесообразно первоначально провести его оценку, взяв пробный период, и после гармонического анализа данных выбрать длину интервала. При обработке данных, в частности данных пробного периода, использовалось быстрое преобразование Фурье.

Это численный метод быстрого определения коэффициентов тригонометрического интерполяционного полинома, приближающего экспериментальные данные [4]. Для точности и сходимости желательно иметь много точек измерения и длинную реализацию. Число равноотстоящих точек по каждому параметру на выбранном интервале измерений должно быть равным 2^N (N – целое и доста-

точно большое число). Чтобы удовлетворить этому требованию при установленном интервале измерений, можно подбирать частоту опроса датчиков. На конечном этапе анализа, когда Δ - длина интервала сбора данных выбрана и есть необходимость использовать максимальную частоту M опроса АЦП, требование иметь 2^N точек опроса по каждому параметру может оказаться невыполнимым. Тогда при измерении n параметров число равноотстоящих данных по каждому из n параметров будет равно:

$$K = \frac{\Delta M}{n}, \quad K \neq 2^N.$$

В этом случае расчет C_n - коэффициентов Фурье и φ_n - фаз должен производиться без применения быстрого преобразования Фурье по классическим формулам разложения в ряд Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n\right), \quad T = \Delta;$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_n = a_n / b_n;$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) dt,$$

где $f(t)$ – разлагаемая в ряд ограниченная функция, имеющая на периоде $T=\Delta$ конечное число максимумов и минимумов, и конечное число разрывов.

При этом интегралы заменяются суммами, а функции $f(t)$ заменяются значениями изменений в K -равноотстоящих точках на интервале Δ . Результаты гармонического анализа и анализа симметричных составляющих могут использоваться при проверке качества электропривода, диагностике неисправностей, расчетах мощности и др.

Мгновенная мощность трехфазной цепи $P(t)$ равна сумме мгновенных мощностей отдельных фаз:

$$P(t) = U_A(t)i_A(t) + U_B(t)i_B(t) + U_C(t)i_C(t), \quad (1)$$

где $U(t)$ и $i(t)$ обозначены напряжения и токи отдельных фаз (индексы указывают на наименование фаз).

Таблица 1

Гармонический состав несимметричной трехфазной системы линейных напряжений

№ гармоники	U_{AB}			U_{BC}			U_{CA}		
1	$\overset{\circ}{AB}_1$	AB_1	220 В	$\overset{\circ}{BC}_1$	BC_1	222 В	$\overset{\circ}{CA}_1$	CA_1	222 В
		φ_{1AB}	282,8°		φ_{1BC}	163°		φ_{1CA}	43,3°
46	$\overset{\circ}{AB}_{46}$	AB_{46}	67,5 В	$\overset{\circ}{BC}_{46}$	BC_{46}	67,3 В	$\overset{\circ}{CA}_{46}$	CA_{46}	68,3 В
		φ_{46AB}	21,4°		φ_{46BC}	89,3°		φ_{46CA}	32,6°
50	$\overset{\circ}{AB}_{50}$	AB_{50}	69,2 В	$\overset{\circ}{BC}_{50}$	BC_{50}	74,5 В	$\overset{\circ}{CA}_{50}$	CA_{50}	67,1 В
		φ_{50AB}	82,4°		φ_{50BC}	200°		φ_{50CA}	319,6°
95	$\overset{\circ}{AB}_{95}$	AB_{95}	41,1 В	$\overset{\circ}{BC}_{95}$	BC_{95}	42,7 В	$\overset{\circ}{CA}_{95}$	CA_{95}	38,9 В
		φ_{95AB}	194,2°		φ_{95BC}	307°		φ_{95CA}	63°
97	$\overset{\circ}{AB}_{97}$	AB_{97}	38,4 В	$\overset{\circ}{BC}_{97}$	BC_{97}	35,6 В	$\overset{\circ}{CA}_{97}$	CA_{97}	39,7 В
		φ_{97AB}	216,3°		φ_{97BC}	93,7°		φ_{97CA}	331°

Таблица 2

**Гармонический состав симметричных составляющих трехфазной системы
векторов линейных напряжений**

№ гармоники	Прямая последовательность			Обратная последовательность		
	$\overset{\circ}{A}B_{1,1}$	$AB_{1,1}$	221 В	$\overset{\circ}{A}B_{2,1}$	$AB_{2,1}$	0,511 В
1	$\overset{\circ}{A}B_{1,1}$	$\varphi_{1,1AB}$	283°	$\overset{\circ}{A}B_{2,1}$	$\varphi_{2,1AB}$	138°
		$AB_{1,46}$	67,5 В		$\overset{\circ}{A}B_{2,46}$	$AB_{2,46}$
46	$\overset{\circ}{A}B_{1,46}$	$\varphi_{1,46AB}$	208°	$\overset{\circ}{A}B_{2,46}$	$\varphi_{2,46AB}$	355°
		$AB_{1,50}$	1,28 В		$\overset{\circ}{A}B_{2,50}$	$AB_{2,50}$
50	$\overset{\circ}{A}B_{1,50}$	$\varphi_{1,50AB}$	342°	$\overset{\circ}{A}B_{2,50}$	$\varphi_{2,50AB}$	81°
		$AB_{1,95}$	1,30 В		$\overset{\circ}{A}B_{2,95}$	$AB_{2,95}$
95	$\overset{\circ}{A}B_{1,95}$	$\varphi_{1,95AB}$	237°	$\overset{\circ}{A}B_{2,95}$	$\varphi_{2,95AB}$	188°
		$AB_{1,97}$	37,9 В		$\overset{\circ}{A}B_{2,97}$	$AB_{2,97}$
97	$\overset{\circ}{A}B_{1,97}$	$\varphi_{1,97AB}$	214°	$\overset{\circ}{A}B_{2,97}$	$\varphi_{2,97AB}$	99°

Таблица 3

Гармонический состав несимметричной трехфазной системы токов

№ гармоники	I_A			I_B			I_C		
	1	$\overset{\circ}{A}_1$	A_1	2,65 A	$\overset{\circ}{B}_1$	B_1	2,63 A	$\overset{\circ}{C}_1$	C_1
φ_{1A}			28,4°	φ_{1B}		267°	φ_{1C}		148°
46	$\overset{\circ}{A}_{46}$	A_{46}	0,12 A	$\overset{\circ}{B}_{46}$	B_{46}	0,11 A	$\overset{\circ}{C}_{46}$	C_{46}	0,10 A
		φ_{46A}	288°		φ_{46B}	158°		φ_{46C}	35°
50	$\overset{\circ}{A}_{50}$	A_{50}	0,10 A	$\overset{\circ}{B}_{50}$	B_{50}	0,11 A	$\overset{\circ}{C}_{50}$	C_{50}	0,10 A
		φ_{50A}	219°		φ_{50B}	332°		φ_{50C}	83°
95	$\overset{\circ}{A}_{95}$	A_{95}	0,027 A	$\overset{\circ}{B}_{95}$	B_{95}	0,03 A	$\overset{\circ}{C}_{95}$	C_{95}	0,017 A
		φ_{95A}	325°		φ_{95B}	98°		φ_{95C}	257°
97	$\overset{\circ}{A}_{97}$	A_{97}	0,025 A	$\overset{\circ}{B}_{97}$	B_{97}	0,02 A	$\overset{\circ}{C}_{97}$	C_{97}	0,014 A
		φ_{97A}	291°		φ_{97B}	170°		φ_{97CA}	90°

Таблица 4

**Гармонический состав симметричных составляющих трехфазной системы
векторов токов**

№ гармоники	Прямая последовательность			Обратная последовательность		
	$\overset{\circ}{A}_{1,n}$	$A_{1,n}$	$\varphi_{1,1A}$	$\overset{\circ}{A}_{2,n}$	$A_{2,n}$	$\varphi_{2,1A}$
1	$\overset{\circ}{A}_{1,1}$	$A_{1,1}$	2,62 А	$\overset{\circ}{A}_{2,1}$	$A_{2,1}$	0,039 А
		$\varphi_{1,1A}$	28°		$\varphi_{2,1A}$	71°
46	$\overset{\circ}{A}_{1,46}$	$A_{1,46}$	0,11 А	$\overset{\circ}{A}_{2,46}$	$A_{2,46}$	0,01 А
		$\varphi_{1,46A}$	280°		$\varphi_{2,46A}$	1,0°
50	$\overset{\circ}{A}_{1,50}$	$A_{1,50}$	0,004 А	$\overset{\circ}{A}_{2,50}$	$A_{2,50}$	0,10 А
		$\varphi_{1,50A}$	238°		$\varphi_{2,50A}$	212°
95	$\overset{\circ}{A}_{1,95}$	$A_{1,95}$	0,006 А	$\overset{\circ}{A}_{2,95}$	$A_{2,95}$	0,025 А
		$\varphi_{1,95A}$	271°		$\varphi_{2,95A}$	329°
97	$\overset{\circ}{A}_{1,97}$	$A_{1,97}$	0,02 А	$\overset{\circ}{A}_{2,97}$	$A_{2,97}$	0,06 А
		$\varphi_{1,97A}$	300°		$\varphi_{2,97A}$	311°

Эта формула верна для всех режимов. Однако в используемой схеме включения преобразователя – звезда без нулевого провода – воспользоваться этой формулой нельзя, так как фазные напряжения не измеряют и доступны для измерения лишь линейные напряжения $U_{AB}(t)$, $U_{BC}(t)$ и $U_{CA}(t)$. В этом случае для расчета мощности вместо формулы (1), соответствующей измерению мощности по методу трех ваттметров, можно воспользоваться приведенной ниже расчетной формулой, соответствующей измерению мощности по методу двух ваттметров [5]:

$$P(t) = U_{AC}(t)i_A(t) + U_{BC}(t)i_B(t). \quad (2)$$

Круговой заменой индексов A , B и C в этом выражении можно получить другие равноценные варианты включения ваттметров и расчетные формулы. Применение указанной формулы позволило определить мощность при частотном пуске и в установившемся режиме (рис. 3) по результатам измерений напряжений и токов. При расчетах непосредственно по формуле (2) на графике $P(t)$ наблюдались высокочастотные пульсации значений мгновенной мощности, которые вероятно связаны с перемножением непрерывной функции $i(t)$ и двухуровневой кусочно-непрерывной функции $U(t)$, принимающей на части каждого интервала ШИМ нулевые значения. Осреднение по одному или нескольким импульсам ШИМ позволило исключить указанные пульсации (см. рис. 3).

При установившемся режиме для вычисления мощности можно использовать результаты расчета симметричных составляющих. Ограничившись первыми гармониками и применяя метод двух ваттметров (2), для $P(t)$ можно получить выражение:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t),$$

где $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – мощности, соответствующие прямой и обратной последовательности первой гармоники, равные:

$$P_n(t) = U_{AC}^n I_A^n \cos \varphi_{ACA}^n + U_{BC}^n I_B^n \cos \varphi_{BCB}^n.$$

В этом выражении n – индекс последовательности ($n=1$ – прямая, $n=2$ – обратная), U и I – линейные напряжения и токи (индексы AC или A у напряжения или тока характеризуют две линии или фазу), φ – угол между соответствующим током и линейным напряжением. Величины, входящие в формулу, могут быть рассчитаны по приведенным выше зависимостям.

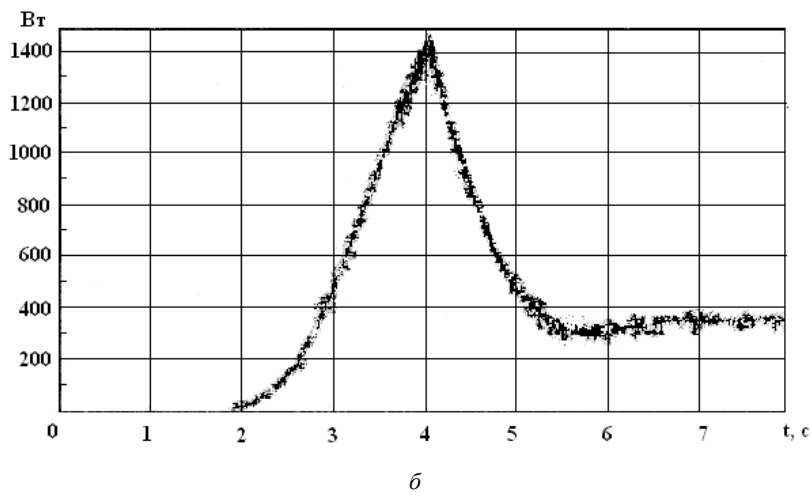
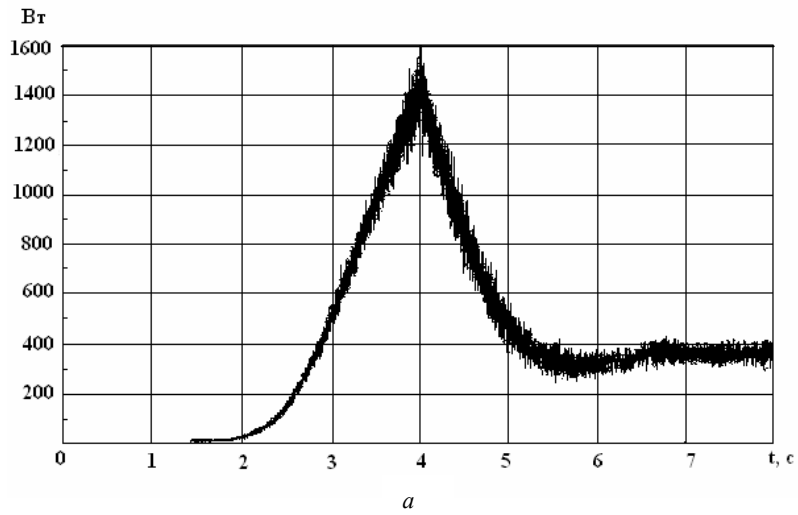


Рис. 3. Расчет мощности:
a - данные расчета мощности $U_{ac} I_a + U_{bc} I_b$, усредненные за 3 периода ШИМ;
б - данные расчета мощности $U_{ac} I_a + U_{bc} I_b$, усредненные за 10 периодов ШИМ

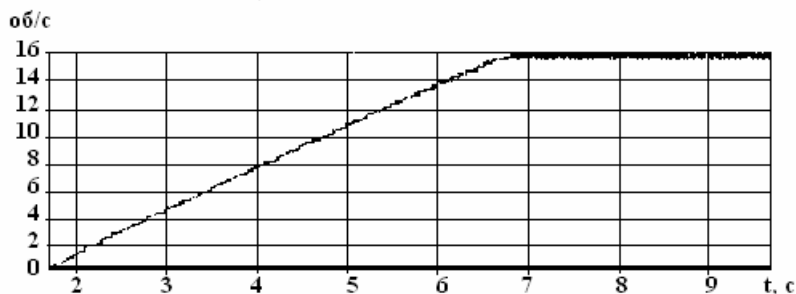


Рис. 4. Зависимость скорости вращения от времени

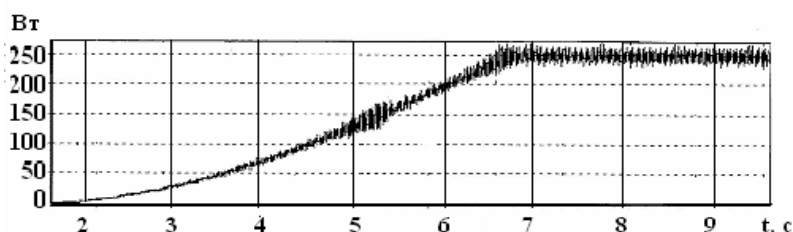


Рис. 5. Мощность, выделяемая в нагрузке

На рис. 4 и 5 приведены экспериментальные зависимости изменения частоты вращения электропривода и мощности, выделяемой в нагрузке, от времени в процессе частотного пуска вплоть до достижения этими параметрами установившихся значений. График скорости построен по дискретным сигналам указанного выше датчика частоты вращения (см. рис. 4). Разгон идет практически с постоянным угловым ускорением $\varepsilon = 20,1 \text{ рад/с}^2$ в течение примерно 5 с с нулевой частоты до 50 Гц (1500 об/мин). Это соответствует требованиям задания, ограничивающим уровень максимального ускорения. Мощность на нагрузке определена как произведение момента, передаваемого на опору статором нагрузочного генератора (измеряемого с помощью датчика силы) и скорости вращения вала генератора. Мощность нагрузки нелинейно возрастает во времени до установившегося значения. В установившемся режиме значение момента, передаваемого балансирной машиной на опору, равно моменту, развиваемому асинхронным двигателем, за вычетом потерь. Мощность, затрачиваемую на разгон роторов асинхронного двигателя и балансирной машины, можно наблюдать на

графике мощности, потребляемой при пуске. Затраты мощности здесь определяются суммой:

$$P(t) = J\varepsilon^2 t + P_n(t) + P_n(t) + P_M(t).$$

Первый член этой суммы представляет собой мощность, затрачиваемую в момент времени t на разгон роторов с моментом инерции J , второй член $P_n(t)$ – мощность на нагрузке (указана выше), $P_n(t)$ – третий член – вентиляционные и тепловые потери в меди и стали, $P_M(t)$ – четвертый член – мощность на создание электромагнитного поля.

Кроме алгоритмов проведения указанных выше измерений и расчетов обеспечено определение частоты питания, нестабильности частоты вращения и других характеристик.

Программно-аппаратный комплекс реализован в виде автоматизированного рабочего места, удобного для сбора данных и обработки. Результат измерений в реальном времени доступен экспериментатору на экране персонального компьютера. Для проведения испытаний в местах эксплуатации был разработан облегченный (мобильный) вариант, в котором отсутствовали датчики скорости и силы. Указанный вариант системы активно использовался при наладке приводов КЭ СУМП для 3-го энергоблока Калининской АЭС и приводов КЭ СУМП АЭС «Бушер» на площадке завода «Атоммаш», г. Волгодонск.

В дополнение к изложенному, в качестве иллюстрации приводим запись одного фазного тока и одного линейного напряжения на участке одного периода при частоте питания 50 Гц (рис. 6) и запись изменения фазного тока за время пуска до установившегося значения (рис. 7).

Характер изменения тока $I(t)$ и мощности $P(t)$ в процессе приведенного экспериментального разгона связан с особенностями управления приводом в этом частотном пуске, в частности, с выбором закономерности изменения индукции.

Численные расчеты для стационарного режима с высокой точностью подтвердили правильность полученных экспериментальных материалов и корректность выбранных алгоритмов обработки.

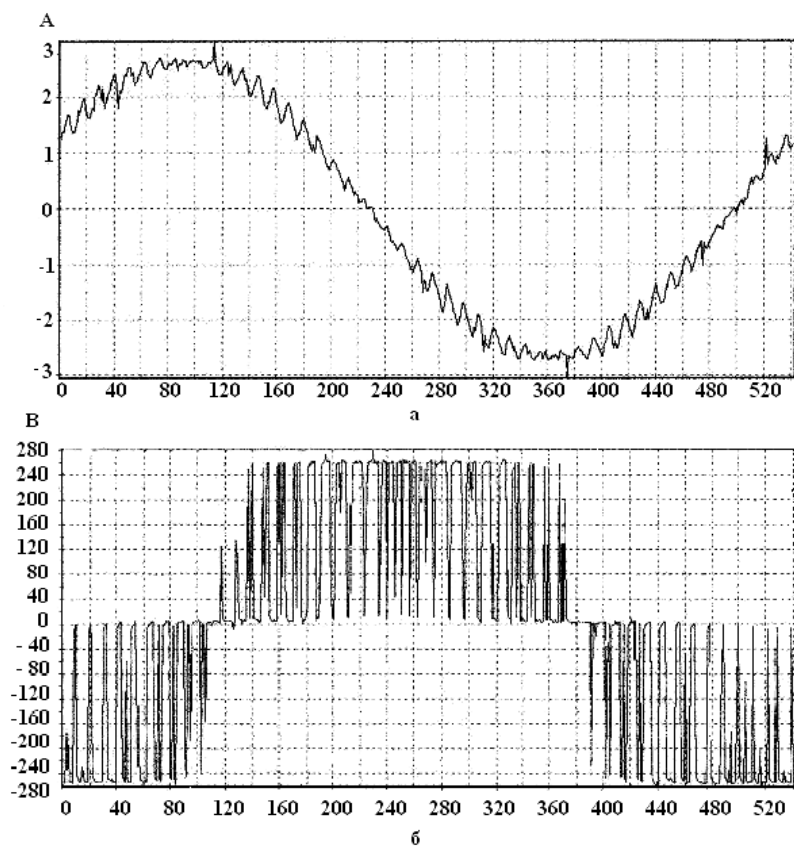


Рис. 6. Фазный ток (а) и линейное напряжение (б) на участке одного периода (1 период, 542 точки, 0,02 с)

Данные сбора по каналам

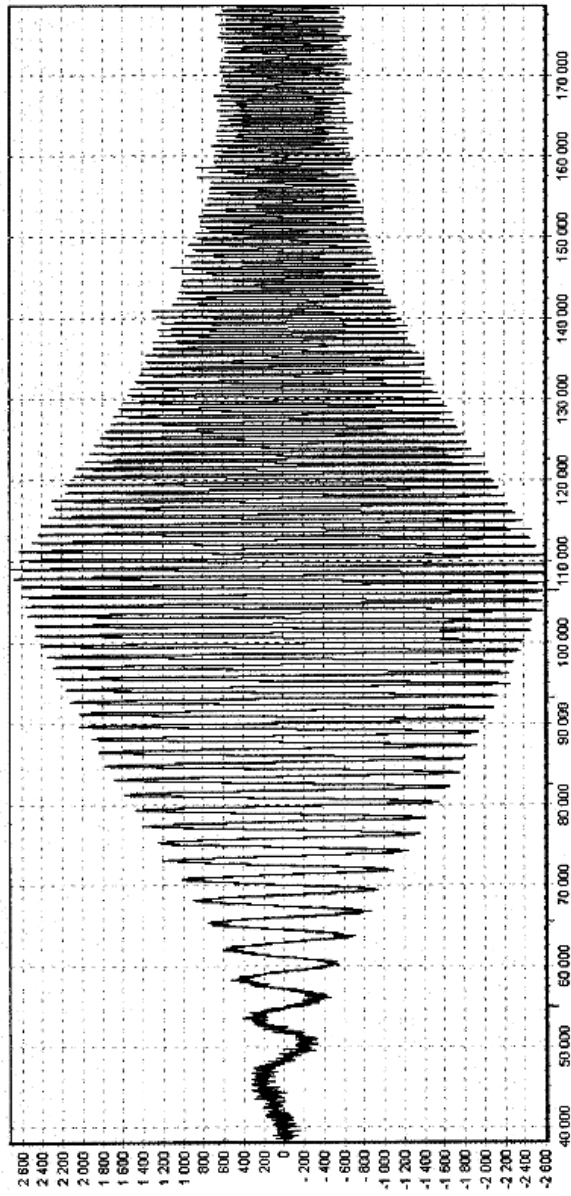


Рис. 7. Изменение фазного тока за время пуска до установившегося значения

Заключение

Представленный программно-аппаратный комплекс реализует измерение в автоматическом режиме основных параметров привода как в условиях испытательного стенда, так и на производстве. Перечень измеряемых параметров, способ отображения и мобильное исполнение позволяют считать комплекс целостным измерительным средством, нацеленным на упрощение и повышение эффективности при разработке и конструировании приводов переменного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротанов Н.А., Курбасов А.С и др. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт. 1991.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. М: Энергия. 1966.
3. Бессонов П.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа. 1986.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука. Физмат. 1973.
5. Арутюнов В.О. Электрические измерительные приборы и измерения. М.: Энергия. 1958.