

УДК 621.314

А.И. Чивенков<sup>1</sup>, И.С. Панфилов<sup>2</sup>, С.Ю. Панфилов<sup>1</sup>, Н.Н. Вихорев<sup>1</sup>, А. Ghedifa<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ  
В АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМАХ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Рассмотрен способ управления инвертором напряжения, позволяющий регулировать потоки энергии в авиационной электросистеме, образованной двумя и более источниками электроэнергии. Показано, что одновременно или раздельно изменяя параметры управляющего сигнала (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока) инвертора возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между электрическими источниками.

*Ключевые слова:* широтно-импульсная модуляция, усилитель класса Д, simulink, активная и реактивная энергии, угол управления.

Совершенствование любых авиационных радиосистем невозможно без соответствующего развития каждой ее составной части, в том числе и электросистемы.

Развитие электросистем производится по различным направлениям с целью сокращения массы и габаритов, обеспечения потребителей электроэнергией номинального качества при любой её (электросистемы) переконфигурации, необходимой для обеспечения гарантированных потоков энергии при частично вышедших из строя первичных источниках электрической энергии.

Современное требование непрерывности электропитания означает, что в течение заданного промежутка времени электросистема должна обеспечить не только непрерывность электропитания потребителя, но и совместную работу первичных источников разных видов, например, постоянного и переменного токов [1].

Неотъемлемой частью таких электросистем является преобразователь постоянного напряжения в переменное (инвертор) с многократной равномерной широтно-импульсной модуляцией (усилитель класса Д) [2]. Особенность работы усилителя класса Д в качестве инвертора в электросистеме состоит в формировании выходного напряжения постоянной частоты на переменную нагрузку (активная и реактивная составляющие ее сопротивления, а также и их соотношения могут изменяться в широких пределах).

Одним из вариантов построения силовой части электросистемы является параллельное соединение инвертора и источника переменного тока и организация их совместной работы на общую нагрузку. Условием функционирования такой электросистемы является достижение равенства параметров выходных напряжений источника переменного напряжения и инвертора. При этом появляется принципиальная возможность за счет изменения выходного напряжения инвертора регулировать соотношение величин потоков энергии от первичных источников вплоть до перехода потребления энергии на один из источников.

Для формирования на выходе синусоидального напряжения инвертор содержит фильтры низких частот, наиболее распространенными среди которых являются LC-фильтры. Наличие фильтра низких частот в свою очередь определяет зависимость коэффициента передачи инвертора от параметров элементов и режимов работы электросистемы. Коэффициент передачи при этом является комплексной величиной, модуль которой характеризует отношение амплитуд входного (управляющего) и выходного напряжений, а аргумент – фазовый угол сдвига между ними.

Инвертор имеет по каждой гармонике отличные друг от друга комплексные коэффициенты передачи:

$$\dot{K}_n = K_n e^{j\delta_n} = \frac{\dot{U}_{тпвых}}{\dot{U}_{тпупр}}, \quad (1)$$

где  $\dot{K}_n$  – комплексные коэффициенты передачи по  $n$ -й гармонике;

$K_n$  – модули коэффициентов передачи по  $n$ -й гармонике (отношение амплитуд выходного  $U_{тпвых}$  и управляющего  $U_{тпупр}$  напряжений по  $n$ -й гармонике);

$\delta_n$  – аргументы коэффициентов передачи по  $n$ -й гармонике (разности фаз выходного  $U_{тпвых}$  и управляющего  $U_{тпупр}$  напряжений по  $n$ -й гармонике).

Для исследования характеристик и режимов работы электросистемы целесообразно применение программных комплексов, позволяющих проводить имитацию (виртуальное или компьютерное представление) процессов в электрических схемах любой сложности.

Для этого используется ряд имитационных моделей в интерактивной системе (программный комплекс) MATLAB 7.9.0 с пакетом расширения SIMULINK [3].

Модель инвертора (рис. 1) состоит:

- из усилителя/делителя напряжения  $K$ ;
- контроллера Generator (ШИМ-модулятор);
- силовой части Invertor, выполненной на основе транзисторного моста;
- Г-образного фильтра (дроссель  $L_f$  и конденсатор  $C_f$ );
- V1 напряжение управления;
- $\hat{1}$  – выход инвертора.

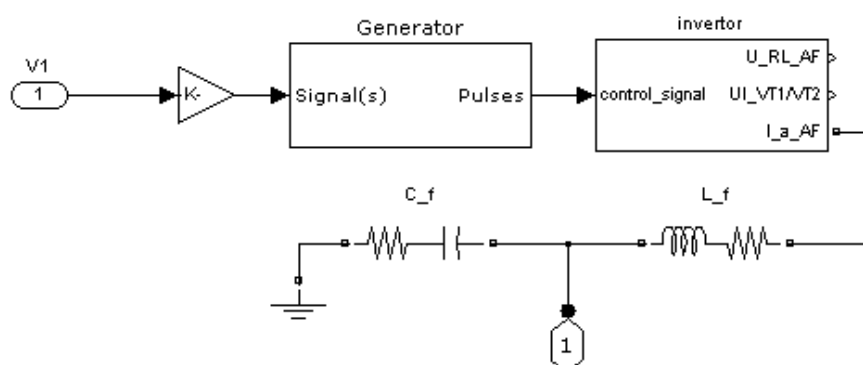


Рис. 1. Эквивалентная схема инвертора

Имитационная модель автономной работы инвертора на нагрузку (рис. 2) предназначена для исследований выходного напряжения при различных значениях полного сопротивления нагрузки, напряжения управления, параметрах фильтра и позволяет определить (форма представления результатов моделирования – на рис. 3):

- время задержки выходного напряжения по отношению к сигналу управления V1 на рис. 1 (разность фаз управляющего и выходного напряжений);
- форму выходного напряжения (его основной гармоники и уровня высших гармонических составляющих);
- модуль коэффициента передачи инвертора;
- мгновенные значения токов элементов фильтра и нагрузки;
- мгновенные значения токов и напряжений ключевых элементов транзисторной мостовой схемы силовой части инвертора.

Модель инвертора, работающего в автономном режиме, состоит из следующих устройств:

- трёхфазного источника ЭДС ( $E_a, E_b, E_c$ ), используемого в качестве задающего генератора;

- измерителя напряжения (measure 1), вывод  $U$  которого используется для управления инвертором, а вывод  $U1$  для сравнения выходного напряжения инвертора с заданным значением;
- инвертора, представленного на рис. 1;
- нагрузки  $Z_{load}$ ;
- измерительных приборов Scope1 - Scope6.

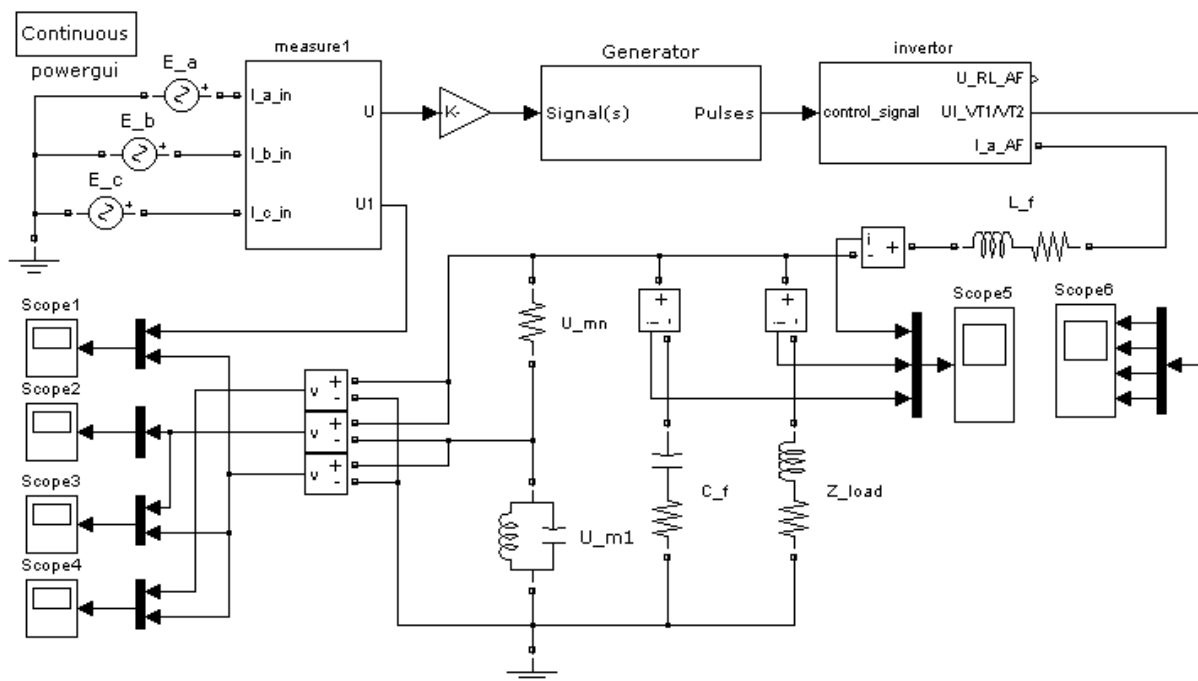


Рис. 2. Имитационная модель автономной работы инвертора

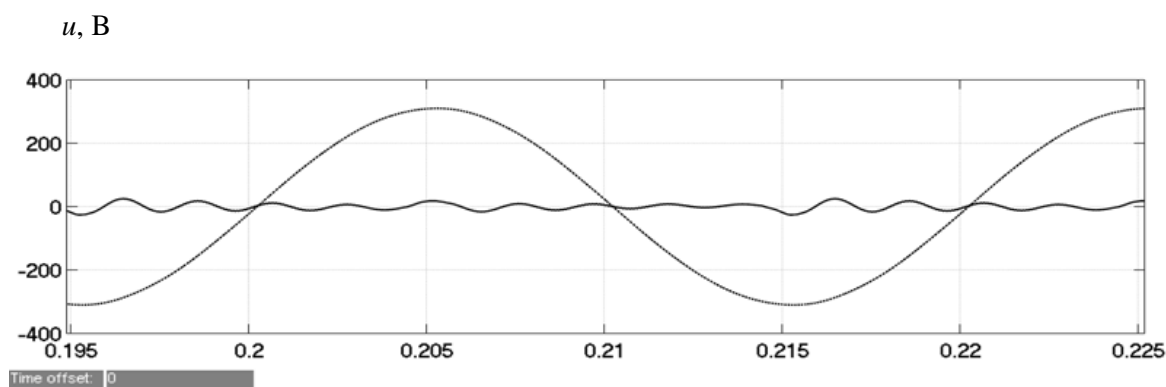


Рис. 3. Мгновенные значения выходного напряжения ( $U_{m1} = 300$  В) и напряжения искажений при автономной работе инвертора

$t, c$

Имитационная модель инвертора, работающего на нагрузку совместно с сетью переменного тока (рис. 4), предназначена для исследований направлений передачи энергии. При различных значениях полного сопротивления и характера нагрузки, параметрах фильтра модель обеспечивает:

- управление временем опережения напряжения управления инвертором по отношению к напряжению сети переменного тока (установку угла опережения  $\delta_{упр}$ );
- установку модуля коэффициента передачи инвертора;

- определение формы выходного напряжения (его основной гармоники и уровня высших гармонических составляющих);
- определение токов элементов фильтра, сети и нагрузки.

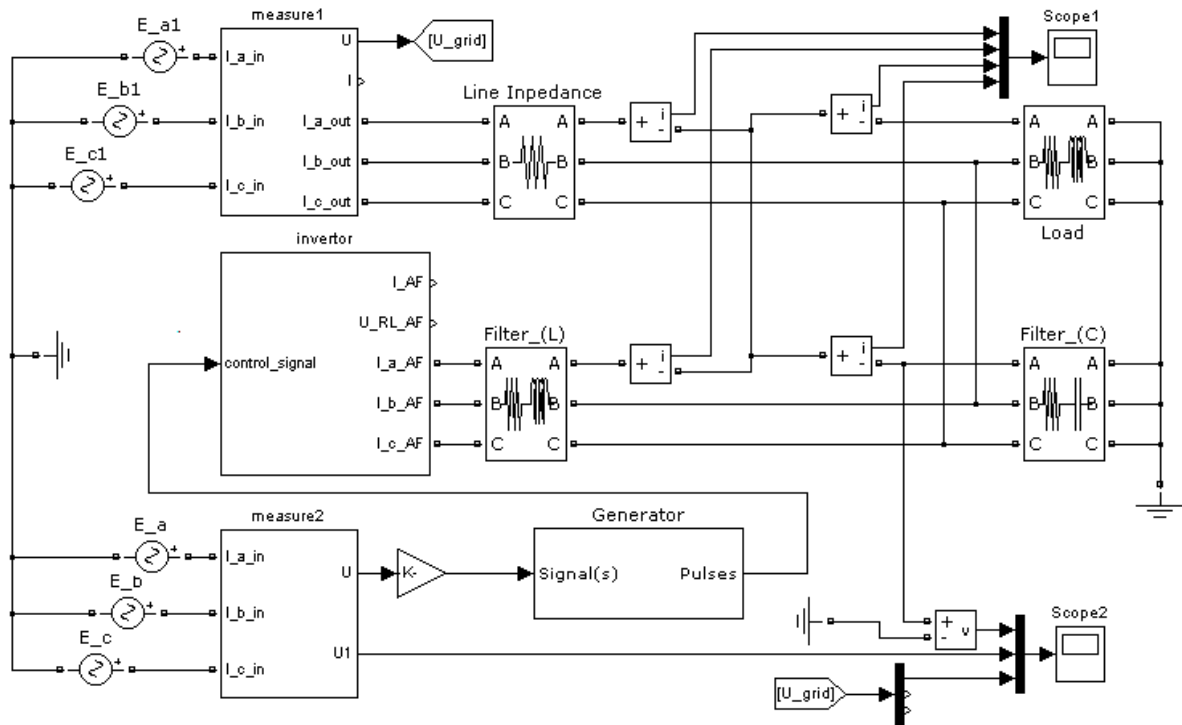


Рис. 4. Имитационная модель работы инвертора совместно с централизованной электросетью

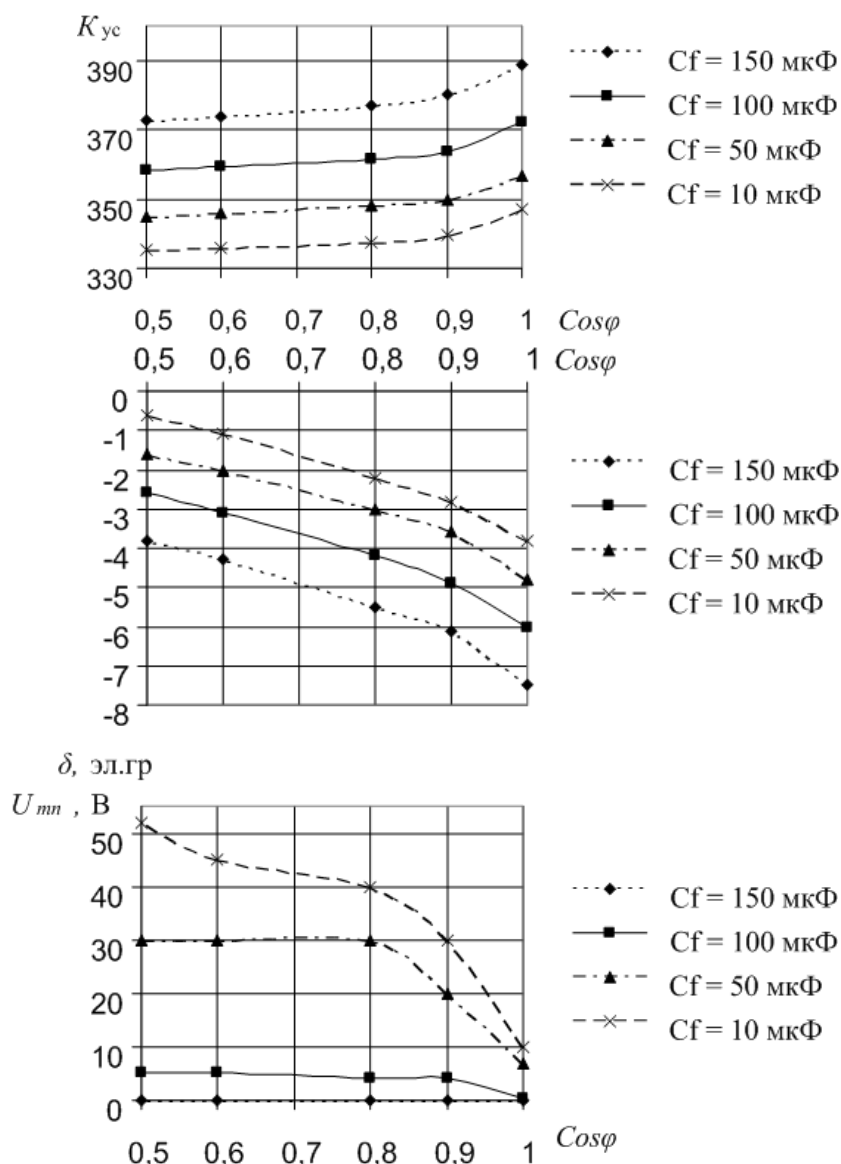
Модель инвертора при параллельной работе с сетью переменного тока состоит из следующих устройств:

- трёхфазного источника ЭДС ( $E_a, E_b, E_c$ ), используемого в качестве задающего генератора для управления инвертором;
- трёхфазного источника ЭДС1 ( $E_{a1}, E_{b1}, E_{c1}$ ), используемого в качестве имитатора сети переменного тока;
- измерителя напряжения (*measure 1*) для контроля ЭДС1;
- измерителя напряжения (*measure 2*), вывод  $U$  которого используется для управления инвертором, а вывод  $U1$  для сравнения выходного напряжения АИН с заданным значением;
- инвертора, выполненного по схеме, приведенной на рис. 1;
- нагрузки *load*;
- измерительных приборов *Scope1 - Scope2*;
- сопротивления линии *Line Impedance*.

Исследования проводились в два этапа. Сначала определялись зависимости фазовых углов запаздывания  $\Delta\varphi$ , выходного напряжения инвертора в зависимости от емкости конденсатора инвертора  $C_f$ , индуктивности дросселя фильтра инвертора  $L_f$ , характера нагрузки  $Z_{нагр}$  ( $\cos\varphi$ ) и уровня напряжения  $E_{ал}$  источника постоянного тока. Результаты исследований приведены на рис. 5.

Далее исследовалась работа инвертора совместно с типовой авиационной электросетью переменного тока на общую нагрузку с целью определения возможности регулирования потоков активной и реактивной энергии.

Анализ режимов работы инвертора при различных его параметрах проводился по симулированным мгновенным значениям напряжений и токов (рис. 6).

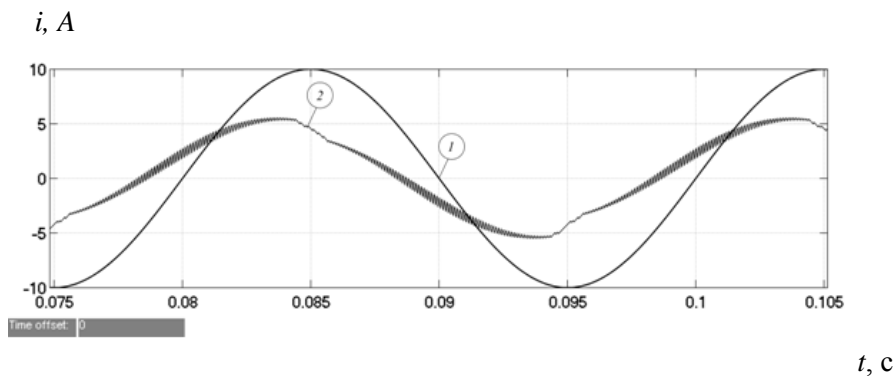


**Рис. 5. Зависимость угла  $\Delta\varphi_3$ ,  $K_{yc}$ ,  $U_{mn}$  от значения  $\cos\varphi$  при автономно работающем инверторе**

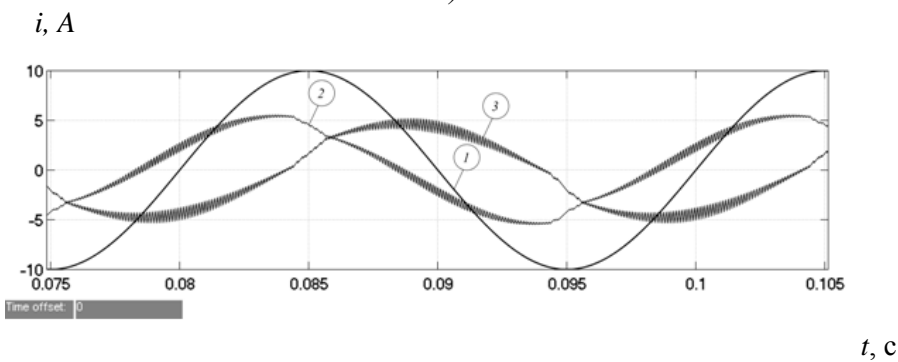
Анализ моделирования показал (рис. 7), что одновременно или раздельно изменяя параметры управляющего сигнала (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока) инвертора возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между электрическими источниками.

Кроме того, возможно раздельно управлять не только модулями (полной составляющей) мощностей, но и их составляющими (активной и реактивной) при различных параметрах нагрузки.

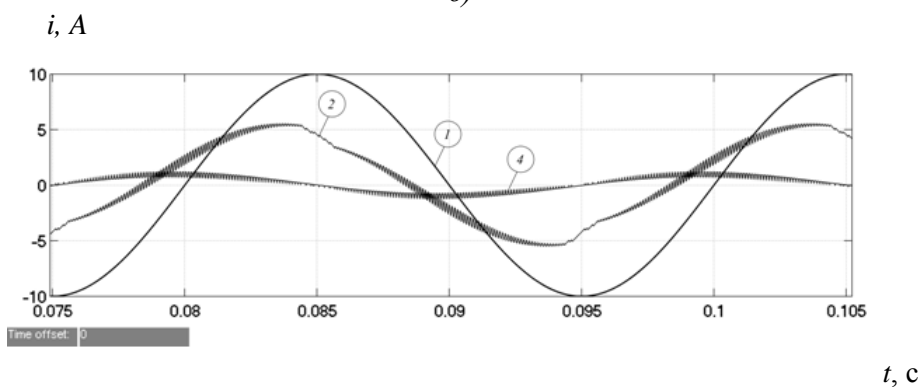
При моделировании установлено, что угол задержки  $\Delta\varphi_3$  выходных фильтров выделения первой гармонической составляющей напряжения равен 5 эл.град. Соответственно направление генерирующих токов определяется величиной задания фазового угла выходного напряжения УП относительно напряжения питающей сети с учётом  $\Delta\varphi_3$ . Фазовые углы первой гармонической составляющей напряжения до фильтра изменялись в пределах от 0 до 10 эл.град., коэффициент задания амплитуды напряжения относительно базового критерия  $K_{Uупр} = 1$  при условии постоянства величин напряжения и соответственно тока нагрузки (потребителя). Полученные результаты исследований приведены на векторной диаграмме (рис. 7).



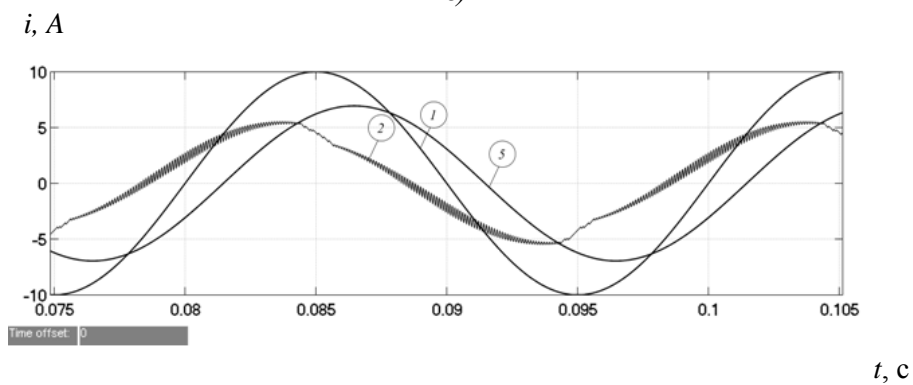
а)



б)



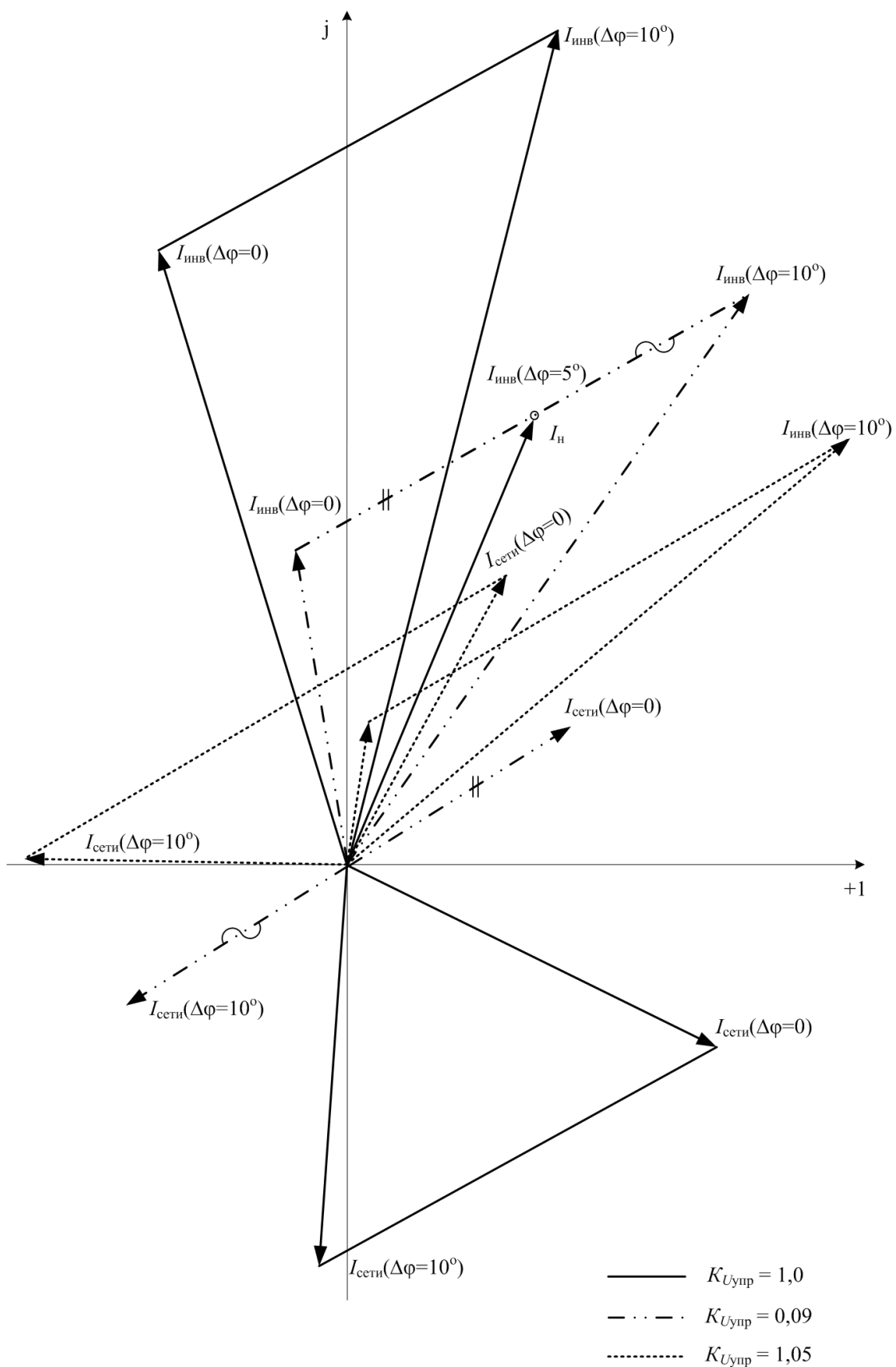
в)



г)

**Рис. 6. Мгновенные значения токов при совместной работе инвертора и централизованной сети на нагрузку (угол  $\delta = 0$  эл. град.):**

*a* – ток централизованной сети; *б* – токи централизованной сети и дросселя инвертора; *в* – токи централизованной сети и конденсатора инвертора; *г* – токи централизованной сети и нагрузки;  
*1* – нормированное напряжение централизованной сети ( $U/31$ ); *2* – ток централизованной сети;  
*3* – ток дросселя АИН; *4* – ток конденсатора АИН; *5* – ток нагрузки



**Рис. 7. Векторные диаграммы амплитудных значений токов от угла  $\delta_{упр}$  ( $C_f = 10 \text{ мкФ}$ ,  $L_f = 0,0125$ ,  $R_{нагр} = 22$ ,  $L_{нагр} = 0,1214$ ,  $\cos\varphi = 0,5$ .)**

Так, например, изменяя величину угла управления  $\delta_{\text{упр}}$ , возможны четыре режима работы (нагрузки) сети:

- активно-емкостная нагрузка ( $\delta_{\text{упр}} > \Delta\varphi_3$ );
- «чисто» емкостная нагрузка ( $\delta_{\text{упр}} = \Delta\varphi_3$ );
- емкостная – «минус активная» ( $\delta_{\text{упр}} < \Delta\varphi_3$ );
- «чисто» «минус активная» ( $\delta_{\text{упр}} = 0$ ).

Введенный термин «минус активная» относится к режиму передачи энергии от инвертора в сеть переменного тока.

Изменяя параметры управляющего сигнала инвертором (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока), возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между источниками электроэнергии.

Режим передачи от инвертора реактивной (емкостной) энергии в сеть обеспечивается при угле фазового сдвига управляющего сигнала, равном углу задержки выходного напряжения инвертора ( $\delta_{\text{упр}} = \Delta\varphi_3$ ).

Регулирование потоков энергии возможно осуществлять при любом характере нагрузки.

### Библиографический список

1. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М., 2010.
2. Моин, В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
3. Simulink 7 - User Guide © COPYRIGHT 1990-2010 by The MathWorks, Inc.

*Дата поступления  
в редакцию 29.01.2015*

**A.I. Chivenkov<sup>1</sup>, I.S.Panfilov<sup>2</sup>, S.J.Panfilov<sup>1</sup>, N.N. Vikhorev<sup>1</sup>, A. Ghedifa<sup>1</sup>**

### MODELING WORK OF A VOLTAGE INVERTER IN AVIATION ELECTRICAL SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC «SIE «POLET»<sup>2</sup>

**Purpose:** Reducing the weight and dimensions of electrical systems of autonomous objects, providing consumers with a nominal power quality for any reconfiguration to exclude a faulty electrical power sources.

**Design/methodology/approach:** To study the methods used to accomplish the task a number of simulation models in an interactive system, MATLAB / SIMULINK.

**Findings:** It is shown that at the same time or separately by changing the parameters of the control signal (amplitude and phase advance angle with respect to the AC line voltage) of the inverter is possible to effectively influence the distribution of energy flows between electrical sources. In addition, it is possible to control not only separate modules (complete component) capacity, but also their components (active and reactive) for different parameters of the load.

**Research limitations/implications:** The way of the inverter control voltage to regulate the flow of energy in the electric power system formed by two or more power sources.

**Originality/value:** The urgency is to provide a collaborative AC sources to the total load or collaboration of different types of sources, such as direct and alternating currents.

*Key words:* pulse-width modulation, amplifier class D, simulink, active and reactive energy, control angle.