

УДК 62.83.52

**А. В. Чермалых**, к.т.н., доц., **В. Н. Пермяков**, к.т.н., доц. (НТУУ «КПИ»),  
**И. Я. Майданский**, ст. преп. (НТУУ «КПИ»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**A. V. Chermalykh, V. N. Permiakov, I. Y. Maidanskyi** (National Technical  
University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

## STUDY OF THE DYNAMICS AND ENERGY CHARACTERISTICS OF FAN INSTALLATIONS WITH VARIABLE SPEED DRIVE

*В работе рассмотрены режимы работы вентиляторной установки как единого технологического комплекса в составе вентилятора и асинхронного электропривода с частотным регулированием. Для проведения исследований синтезирована компьютерная модель, которая позволяет оценить характер протекания динамических и энергетических процессов в электромеханической системе, а также дает возможность провести анализ статических характеристик вентилятора относительно выбора рабочей точки и момента сопротивления.*

**Ключевые слова:** вентилятор, электропривод, частотное управление, ПИД-регулятор, динамика, энергетические характеристики.

*В роботі розглянуті режими роботи вентиляційної установки як єдиного технологічного комплексу у складі вентилятора і асинхронного електроприводу з частотним регулюванням. Для проведення досліджень синтезована комп'ютерна модель, яка дозволяє оцінити характер протікання динамічних і енергетичних процесів в електромеханічній системі, а також дає можливість провести аналіз статичних характеристик вентилятора щодо вибору робочої точки і моменту опору.*

**Ключові слова:** вентилятор, електропривод, частотне управління, ПИД-регулятор, динаміка, енергетичні характеристики.

*The paper considers modes of ventilation unit as a single technological complex of fans and asynchronous electric drive with frequency regulation. For research synthesized computer model which allows us to estimate the character of the dynamic and energetic processes in the electromechanical system and also makes it possible to analyze the static characteristics of the fan on the choice of the working point and moment of resistance.*

**Keywords:** fan, power, frequency control, PID regulator, dynamics, energy characteristics.

**Введение.** При проектировании и эксплуатации вентиляторных установок необходимо обеспечить правильный выбор рабочей точки, в которой производительность и давление вентилятора соответствуют характеристике вентиляционной сети. Наиболее эффективно эта задача решается применением регулируемого электропривода переменного тока в качестве привода вентиляторной установки. В настоящее время в литературных источниках

вентиляторные установки рассматриваются как единый технологический комплекс совместно с электроприводом[1], а при проведении исследований режимов их работы в основном используются методы структурного моделирования. В этом случае производится оценка динамики поведения системы, однако отсутствует возможность получения информации об энергетических характеристиках. Поэтому представляет интерес использования компьютерных исследований для корректного функционирования реальных вентиляторных установок.

**Цель работы.** Разработка имитационной модели вентиляторной установки главного проветривания для исследования динамических режимов и энергетических процессов.

**Результаты исследований.** В работе вентиляторная установка представлена в виде единого технологического комплекса, в состав которого входят: непосредственно вентилятор и электропривод. Выбор структуры электропривода с частотно-регулируемым короткозамкнутым асинхронным электродвигателем связан с рекомендациями ведущих фирм-производителей и массовым применением в настоящее время такой электромеханической системы для турбомеханизмов, особенно для вентиляторов. Излагаемый материал является продолжением и дополнением к публикации [2].

В качестве объекта в работе рассмотрен центробежный вентилятор главного проветривания шахт и рудников ВЦ-16 (производительность  $19,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , давление 3110 Па, коэффициент полезного действия 0,85) с приводным асинхронным короткозамкнутым электродвигателем ВАО2-280L10 (мощность 75 кВт, напряжение 380 В, частота вращения 1000 об/мин).

Для проведения исследований в среде *MATLAB* разработана специальная имитационная модель (рис. 1), которая состоит из нескольких функционально объединенных составных частей: виртуальной (силовой канал электропривода), структурной (система управления) и математической (вентилятор).

Силовой канал частотно-регулируемого асинхронного электропривода выполнен на основе виртуальных блоков специализированного пакета *SimPowerSystems* [3] по схеме преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока и включает в себя следующие элементы (в скобках указаны основные параметры, вводимые в поля настроек блоков в системе единиц СИ):

*АС* – трехфазная сеть переменного тока (линейное напряжение, частота сети, сопротивление и индуктивность источника);

*QF* – силовой автоматический выключатель на входе (сопротивление в замкнутом состоянии);

*AQF* – блок управления автоматом (времена подачи сигналов на включение/отключение);

*UVI* – трехфазные датчики напряжений и токов (вид напряжений – линейные или фазные);

*LF* – фильтр электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью (сопротивление и индуктивность);

$U$  – выпрямитель на диодах (сопротивление вентилей, падение напряжения на них);

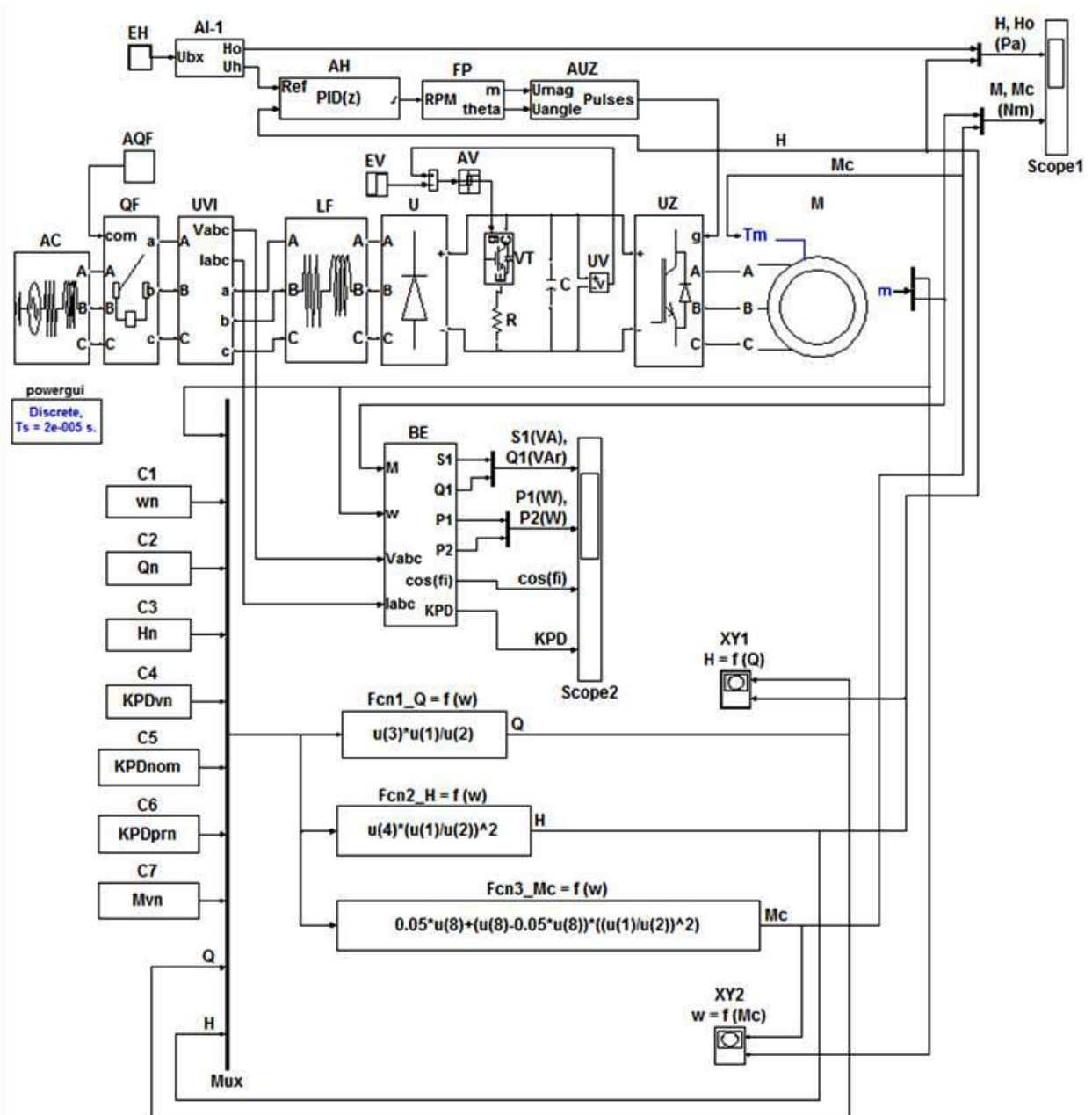


Рис. 1. Имитационная модель вентиляторной установки:

$VT$  – транзистор *IGBT* (сопротивление) подключения тормозного резистора  $R$  (сопротивление);  $C$  – конденсаторный фильтр в звене постоянного тока (емкость);  $UV$  – датчик напряжения в звене постоянного тока (отсутствуют);  $UZ$  – автономный инвертор напряжения преобразователя частоты на транзисторных *IGBT*-модулях (сопротивление в открытом состоянии, падение напряжения на транзисторах и обратных диодах);  $M$  – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (мощность, напряжение, частота сети; сопротивление и индуктивность статора;

приведенные к статору сопротивление и индуктивность ротора; взаимная индуктивность; момент инерции, коэффициент трения, число пар полюсов; начальное состояние машины).

В зависимости от технологической ситуации управление вентиляторной установкой можно осуществлять по скорости  $\omega$ , производительности  $Q$  или давлению  $H$  за счет введения в систему управления электроприводом отрицательной обратной связи по требуемой координате. Поскольку скорость и производительность вентилятора связаны между собой линейной зависимостью, то поведение системы более, менее очевидно, поэтому представляет интерес рассмотрение возможности регулирования непосредственно давления вентилятора.

Система управления электроприводом построена по современной структуре с одним цифровым ПИД-регулятором давления  $AH$ . На входе установлен стандартный задатчик интенсивности первого порядка  $AI-1$ , который содержит последовательно соединенные нелинейный элемент с релейной характеристикой и цифровой интегратор, охваченные единичной отрицательной обратной связью. Роль оператора машиниста выполняет блок заданных значений давления  $EH$ . Функциональный преобразователь  $FP$  формирует рекомендуемый для вентиляторов закон управления  $U / f^2 = const$ .

Система управления автономным инвертором  $AUZ$  обеспечивает режим ШИМ-модуляции с заданной частота коммутации вентиляей.

Управление блоком тормозного резистора обеспечивает нелинейный элемент  $AV$  относительно величины задаваемого блоком  $EV$  максимального напряжения в звене постоянного тока. Все элементы управляющего канала реализованы на базе блоков основного пакета *Simulink*.

С помощью виртуального осциллографа *Scope1* имеется возможность фиксации характера протекания переходных процессов основных контролируемых координат: давления, электромагнитного и статического моментов двигателя (рис. 2, а).

Полученные диаграммы, демонстрируют высокую точность отработки регулируемой координаты по давлению в диапазоне  $D = 2:1$ . Бросок момента в начале запуска обусловлен пассивным характером нагрузки при наличии момента холостого хода, с чем связано некоторое запаздывание по давлению в начале пуска.

Энергетические показатели асинхронного электропривода вентилятора с частотным регулированием определяются подсистемой  $BE$ , основным элементом которой является блок *Active & Reactive Power*, который из трехфазной системы напряжений и токов после автоматического выключателя выделяет активную  $P_1$  и реактивную  $Q_1$  составляющие потребляемой мощности. По известным зависимостям определяются полная мощность  $S_1 = (P_1^2 + Q_1^2)^{1/2}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi = P_1/S_1$  и коэффициент полезного действия  $\eta = P_1/P_2$ , при этом определяется и механическая мощность на валу двигателя  $P_2 = M \cdot \omega$ .

Протекание энергетических процессов фиксируется осциллографом *Scope2* (см. рис. 2, б), который выполнен четырехканальным относительно полной и реактивной мощности, активной и механической мощности, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия.

Следует отметить незначительное потребление частотно-регулируемым электроприводом вентиляторной установки реактивной мощности, что позволяет получить  $\cos\varphi = 0,96$  и выше, при этом и коэффициент полезного действия достаточно высок  $\eta \geq 0,95$ .

Модель самого вентилятора собрана на базе универсального математического блока *Fcn* пакета *Simulink*, который по сути представляет собой вычислитель требуемых функций.

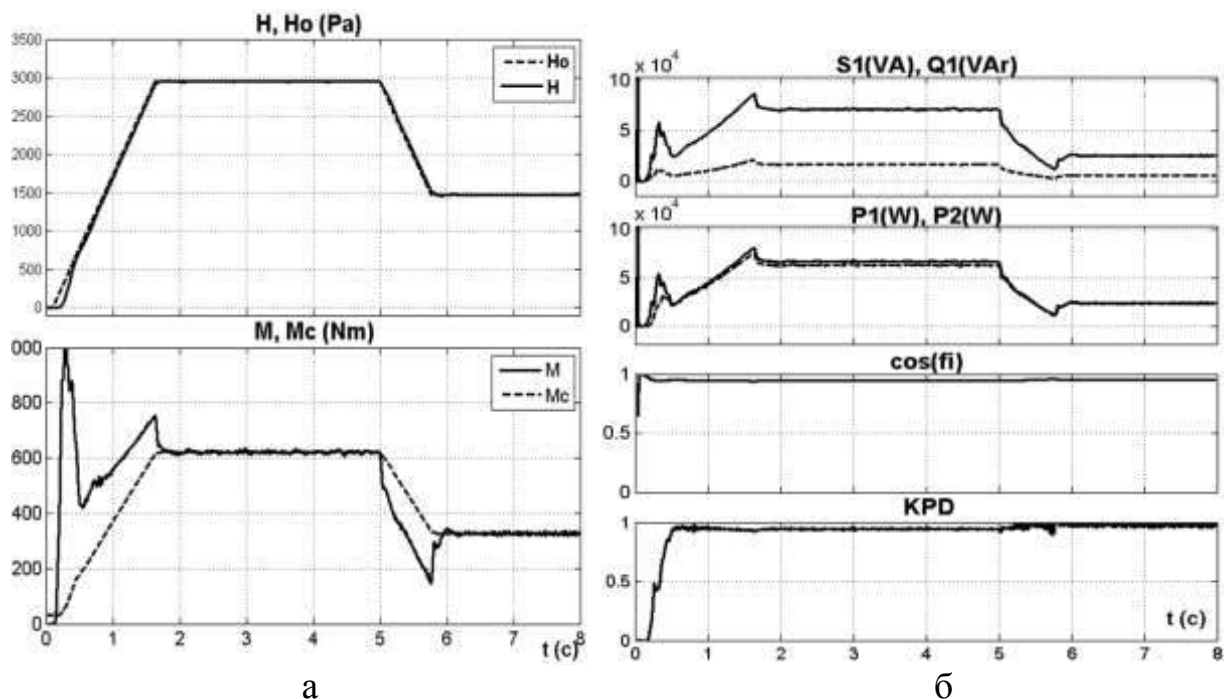


Рис. 2. Графики переходных процессов вентиляторной установки:  
а – технологические, б – энергетические

Блоки *Fcn1* и *Fcn2* – реализуют зависимости от скорости соответственно производительности  $Q = f(\omega)$  и давления  $H = f(\omega)$  вентилятора:

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}, \quad H = H_{\text{ном}} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \text{ где:}$$

$Q_{\text{ном}}$  – номинальная производительность вентилятора (паспортные данные),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная рабочая угловая скорость двигателя (определяется по аэродинамическим характеристикам вентилятора),  $1/\text{с}$ ;  $H_{\text{ном}}$  – номинальное полное давление вентилятора (паспортные данные), Па.

Блок *Fcn3* – вычисляет момент статического сопротивления  $M_c = f(\omega)$



$$M_c = M_{xx} + (M_{в.ном} - M_{xx}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot H_{ном}}{\eta_{в.ном} \cdot \omega_{ном}}, \text{ где:}$$

$M_{в.ном}$  – номинальный момент вентилятора, Н·м;  $M_{xx} \approx 0,05 \cdot M_{в.ном}$  – момент холостого хода, Н·м;  $\eta_{в.ном}$  – номинальные значения КПД вентилятора (паспортные данные), о.е.

Необходимые для реализации приведенных формул номинальные значения параметров задаются блоками  $C1...C7$  в виде констант. Используя объединитель  $Мих$  вычислители выбирают необходимые сигналы и формируют на выходе текущие значения соответствующих величин  $Q$ ,  $H$ ,  $M_c$ . Визуализацию работы модели в виде фазовых траекторий обеспечивают графопостроители  $XY1$  – характеристика  $H = f(Q)$  (рис. 3, а) и  $XY2$  – зависимость  $\omega = f(M_c)$  (рис. 3, б).

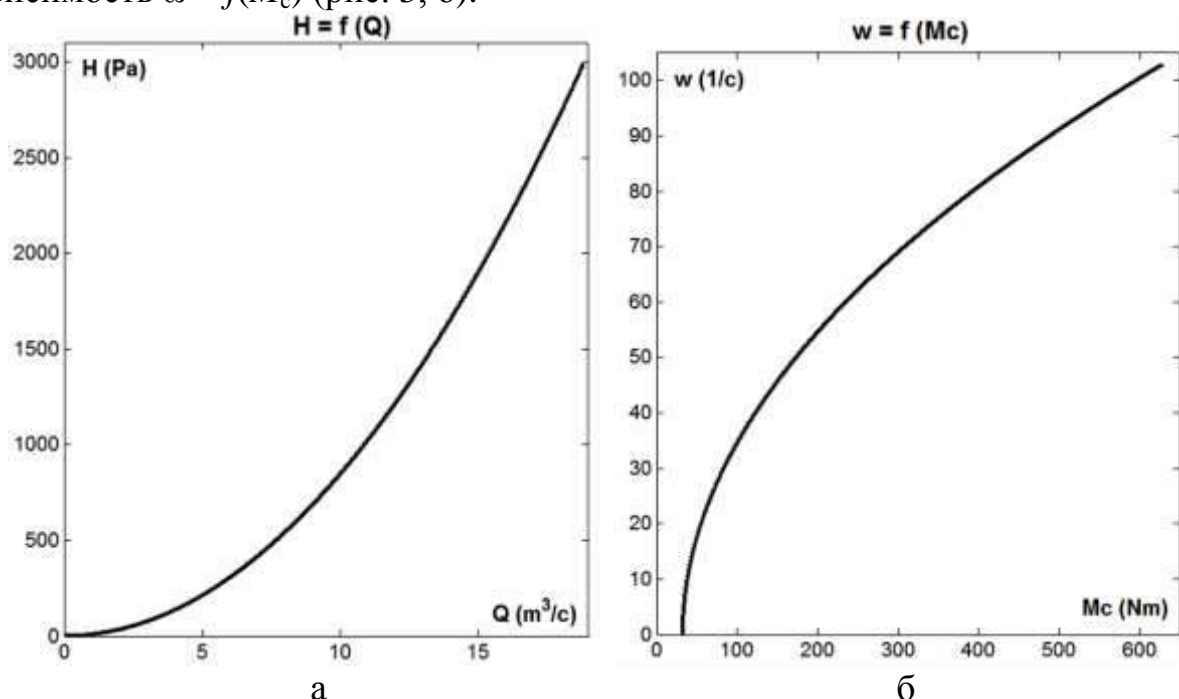


Рис. 3. Статические характеристики вентилятора:

а –  $H = f(Q)$ , б –  $\omega = f(M_c)$

Зависимость  $H = f(Q)$  определяет оптимальные значения рабочих точек вентиляционной сети для любого значения скорости приводного двигателя вентилятора  $\omega$ .

График  $\omega = f(M_c)$  характеризует вентиляторный характер изменения нагрузки с повышенной точностью расчетов, так как при определении значения момента сопротивления  $M_c$  в любой момент времени учитывается величина угловой скорости  $\omega$ .

### Выводы

Полученные результаты показывают, что синтезированная имитационная модель вентиляторной установки позволяет оценить не только динамику поведения системы, но и энергетические показатели в случае использования

виртуальной составляющей, учитывающей функционирование реальных электротехнических элементов системы электропривода.

Модель является универсальной для вентиляторных установок с частотно-регулируемым электроприводом. Для получения статических, динамических и энергетических характеристик вентиляторной установки необходимо задать только номинальные параметры вентилятора и приводного электродвигателя.

### **Список использованных источников**

1. Фасчиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий / В.Н. Фасчиленко. – М.: МГК, 2011. – 260 с.
2. Чермалых А.В. Моделирование технологических режимов работы насосных установок с частотно-регулируемым электроприводом / А. В. Чермалых, И. Я. Майданский, О. Б. Дотсенко, Я.И. Затирка // Проблемы энергоресурсозбережения в электротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2014, Вол. 1/2014(2), с. 49 - 52.
3. Герман-Галкин С.Г. Матлаб & Симулинк. Проектирование мегатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – Ст. Петербург: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

*Статья поступила в редакцию 27.02.2015 г.*