

Подбор вентилятора с заданными параметрами

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

В данной статье рассматривается задача подбора вентилятора по заданным параметрам. В качестве основных параметров будут использоваться расход воздуха и давление. Для вентиляторов, характеристика которых не позволяет получить требуемые расход воздуха и давление, будет рассмотрена задача изменения характеристики путем регулирования рабочей частоты.

Ключевые слова: РНР, промышленная вентиляция, частотное регулирование.

Введение

Вентиляционная система является одной из важнейших составляющих современных промышленных предприятий, торговых комплексов, концертных залов и других крупных зданий и сооружений. Важнейшей характеристикой работы вентиляционной системы является расход воздуха — величина объема воздуха, проходящая через вентиляционную систему за единицу времени. Современные вентиляционные системы обладают разветвленной системой воздуховодов, воздухораспределителей и других составных частей. В процессе движения через них воздух испытывает сопротивление, которое выражается падением давления (аэродинамическое сопротивление) и, соответственно, ухудшением качества вентилирования. Поэтому вентиляционная установка должна создавать давление, необходимое для преодоления аэродинамического сопротивления. При проектировании сооружений, как правило, необходимые величины расхода воздуха и давления рассчитываются, исходя из государственных стандартов и структуры вентиляционной сети. Возникает задача подбора из заданного множества

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

вентиляторов подходящей установки, которая сможет обеспечить значения расхода воздуха и давления, близкие к требуемым. В данной статье будет рассматриваться алгоритм, решающий поставленную задачу, и его программная реализация на языке программирования РНР.

Нередко возникают ситуации, когда заказчику необходима установка, работающая в достаточно нестандартных условиях. Имеющееся оборудование не всегда может обеспечить работу при таких параметрах в стандартном режиме работы, и возникает задача изменения рабочей характеристики вентилятора для получения требуемых результатов. В данной статье будет рассматриваться один из подходов решения этой задачи — изменение рабочей характеристики вентилятора путем регулирования рабочей частоты вращения колеса.

В результате будет реализован алгоритм, решающий задачу подбора вентилятора с применением, если необходимо, частотного регулирования, на языке программирования РНР.

Постановка задачи

Основными параметрами работы вентиляторов являются расход воздуха L и давление p (падение давления воздуха). Характеристика вентилятора выражает зависимость давления от расхода воздуха для данного вентилятора при стандартных условиях, т. е. рабочей частоте 50 Гц. Характеристику вентилятора можно задать общим уравнением

$$p = f(L).$$

Таким образом, для заданных параметров L_0 и p_0 требуется подобрать вентилятор, характеристика которого позволяет получить рабочие значения L и p , достаточно близкие к заданным.

Зависимость давления от расхода воздуха для вентилятора $f(L)$ нередко выражается достаточно сложным уравнением. При этом для разных типов вентиляторов такая зависимость может быть существенно различной. Поэтому на практике используется приближение уравнения зависимости интерполяционными многочленами или сплайнами. Такой подход позволяет, во-первых, разработать общую методику расчетов для вентиляторов с существенно разными характеристиками, а во-вторых, использовать мощный математический аппарат работы с кусочно-полиномиальными функциями для ускорения вычислений и уменьшения потенциальных погрешностей при расчетах.

Подбор вентилятора с заданными параметрами

В случае, если характеристика вентилятора не позволяет получить подходящие значения L и p , для некоторых моделей вентиляторов возможно изменить характеристику вентилятора путем регулирования частоты вращения рабочего колеса. В этом случае можно рассматривать параметрическое уравнение зависимости давления от расхода воздуха, где в качестве параметра будет использоваться частота:

$$p = f(L, n).$$

Задача частотного регулирования сводится к нахождению такого значения частоты n_0 , при которой будет выполнено соотношение

$$p_0 = f(L_0, n_0),$$

где L_0 и p_0 — требуемые значения расхода воздуха и давления.

При расчете сложных вентиляционных установок, состоящих из нескольких секций, необходимо учитывать давление на различных секциях. Таким образом, требуемая величина p_0 должна быть такой, чтобы с учетом падения давления воздуха на всех секциях на выходе было давление, необходимое заказчику.

Далее будет подробно рассмотрен алгоритм подбора вентиляторов с учетом всех тонкостей, описанных выше. Для заданных величин L_0 и p_0 будет получен перечень подходящих вентиляторов с указанием, если это необходимо, величины частотного регулирования.

Алгоритм подбора вентиляторов

Структура базы данных с характеристиками вентиляторов

Будем использовать по три таблицы для каждого типа вентиляторов. В первой таблице будем хранить информацию о вентиляционных колесах, во второй — информацию о двигателях. Третья таблица — вспомогательная, служит для совместного использования первых двух таблиц.

Для колес будем хранить диаметр колеса, диаметр вала, максимальный расход воздуха, максимальное давление и максимальную частоту. Наконец, будем хранить коэффициенты полинома, описывающего зависимость давления от расхода воздуха при стандартной частоте. Для расчетов будем использовать модель приближения данной зависимости через полиномы степени не выше 6. Таким образом, будем хранить в базе данных семь коэффициентов.

Для двигателей будем хранить диаметр вала и число оборотов в минуту для стандартной частоты в 50 Гц. Для числа оборотов будем хранить две величины — теоретическую, которая является стандартной и, как правило, равняется одному из чисел 3000, 1500, 1000 или 750. Вторая соответствует реальному значению и, как правило, несколько отличается от теоретической. Например, для колес с теоретической частотой 3000 оборотов в минуту возможны значения 2730, 2800 оборотов в минуту, а для колес с теоретической частотой 1500 — 1410, 1390 и т. д.

Третья таблица будет хранить все совместимые пары двигатель-колесо. Соответственно, в ней будут храниться ссылка на двигатель, ссылка на колесо и вспомогательные данные о типоразмере установки.

Помимо перечисленных данных, таблицы хранят и другую информацию — наименования частей, информацию о производителе, коэффициентах шума, вольт-амперных характеристиках и др. Поскольку для рассмотренной задачи эта информация не играет существенной роли, мы не будем на ней подробно останавливаться.

Программная реализация алгоритма подбора вентилятора

Итак, заданы требуемый расход воздуха L_0 и давление p_0 . Для начала опишем алгоритм получения для каждого вентилятора рабочих значений L и p .

Пусть характеристика вентилятора выражается функцией
$$p = f(L).$$

Вначале найдем корень уравнения

$$f(L) = \frac{p_0}{L_0^2} L^2.$$

Обозначим найденный корень как L' . Соответствующую величину давления $p = f(L')$ обозначим как p' . Рассмотрим далее два случая.

- $p' \leq p_0$. В этом случае L' и p' — искомые рабочие значения вентилятора.
- $p' > p_0$. В этом случае в качестве рабочих значений вентилятора нужно взять L_0 и $f(L_0)$.

С геометрической точки зрения алгоритм можно описать следующим образом. Рассмотрим координатную плоскость, в которой в качестве x -координаты будем использовать расход воздуха, а в качестве

Подбор вентилятора с заданными параметрами

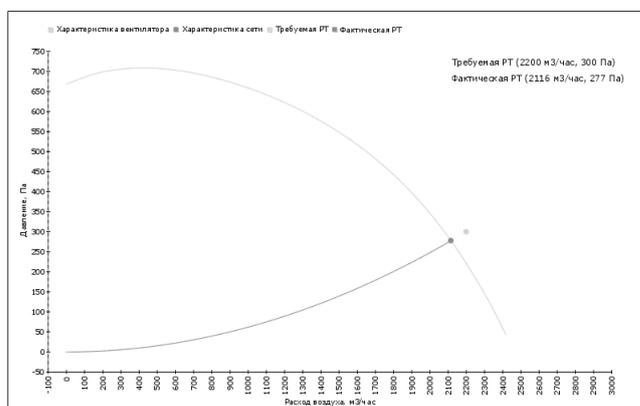


Рис. 1: Подбор вентилятора. Случай $p \leq p_0$.

y -координаты — давление. Тогда мы вначале находим точку пересечения графика функции $y = f(x)$ с параболой $y = \frac{p_0}{L_0^2}x^2$, которая, очевидно, проходит через точку (L_0, p_0) . Если найденная точка находится ниже и левее точки (L_0, p_0) , то мы берем ее в качестве искомой (рис. 1). В противном случае мы проводим вертикальную прямую через точку (L_0, p_0) и в качестве ответа берем точку пересечения этой прямой с графиком $f(x)$ (рис. 2).

Перейдем к программной реализации описанного алгоритма.

Величине L_0 будет соответствовать переменная `$airInletLMax`. В качестве p_0 будем использовать переменную `$airPressureDropFull`, которая будет соответствовать сумме двух слагаемых — падению давления на всех секциях установки `$airPressureDropSum` и требуемому давлению заказчика `$airPressureDropFree`. Переменная `$size` будет содержать рассматриваемый типоразмер установки.

Вначале с помощью SQL-запроса выберем из базы данных все потенциально возможные варианты для заданных параметров (типоразмера, расхода воздуха, давления).

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

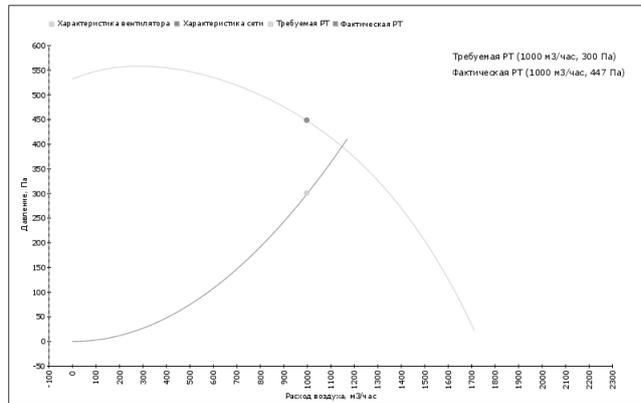


Рис. 2: Подбор вентилятора. Случай $p > p_0$.

```
$fans = Yii::app()->db->createCommand()  
->select('*')  
->from('our_fans_fan_engine fe')  
->join('our_fans_fan f', 'f.code = fe.fan_code')  
->join('our_fans_engine e', 'e.engine_id = fe.  
engine_id')  
->where('seria_id = :seria_id AND seria_size = :  
seria_size', array(  
    'seria_id' => $this->cpSeria->id,  
    'seria_size' => $size  
))  
->andWhere('f.l_max >= :l_max AND f.p_max >= :p_max',  
    array(  
        'l_max' => $airInletLMax,  
        'p_max' => $airPressureDropFull  
    ))  
->queryAll();
```

Далее нужно рассмотреть каждый из вариантов. Вначале найдем корень рассмотренного выше уравнения $p = f(L)$.

Подбор вентилятора с заданными параметрами

```
foreach ($fans as $i => $fan) {
    $globalvar = array(
        'davlenie' => $airPressureDropFull,
        'ldano' => $airInletLMax,
        '0' => $fan['x0'],
        '1' => $fan['x1'],
        '2' => $fan['x2'],
        '3' => $fan['x3'],
        '4' => $fan['x4'],
        '5' => $fan['x5'],
        '6' => $fan['x6'],
        'kn' => $fan['n_max'] / $fan['n0bAsinhr']
    );
};
```

Переменная `$globalvar` используется для передачи параметров классу `RootFinding`, который и находит корень соответствующего уравнения методом касательных. В качестве параметров будут использоваться коэффициенты полинома шестой степени, заданные значения расхода воздуха и давления, а также отношение предельно допустимой частоты установки к стандартной частоте.

Далее вызовем метод класса `RootFinding`, вычисляющий корень уравнения.

```
$mroot = RootFinding::factory('Secant');
$root = $mroot->compute('fxx', 0, $fan['l_max']);
$x = $mroot->getRoot();
```

Здесь `fxx` — функция, которая описывает зависимость $p = f(L)$. Эта функция будет рассмотрена позднее.

Теперь, как было указано выше, если давление в найденной точке больше нужного, мы должны взять другую точку. Скорректируем значение расхода воздуха, так как остальные величины, включая давление, будут получены одинаковым способом.

```
if ($x > $airInletLMax) {
    $x = $airInletLMax;
}
```

Выполним общую проверку на допустимость найденного значения расхода воздуха.

```
$Lwork = $x;
if ($Lwork <= 0 || $Lwork > $fan['l_max']){;
    continue;
}
```

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

Далее будем считать, что если относительная погрешность найденной величины расхода воздуха и заданной величины больше 10%, то установка нам не подходит. Величина отклонения в 10% является эмпирической и соответствует мировому опыту эксплуатации вентиляционных установок.

```
if (($airInletLMax - $x) / $airInletLMax > 0.1) {
    continue;
}
```

Теперь вычислим рабочее давление при найденном расходе воздуха.

```
$kn = $fan['n_max'] / $fan['n0bAsinhr'];
$x = $x * $kn;
$Pwork = ( $fan['x0'] +
    $fan['x1'] * $x +
    $fan['x2'] * pow($x, 2) +
    $fan['x3'] * pow($x, 3) +
    $fan['x4'] * pow($x, 4) +
    $fan['x5'] * pow($x, 5) +
    $fan['x6'] * pow($x, 6)) / $kn / $kn;
```

Выполним проверку допустимости найденного значения давления.

```
if (($Pwork <= 0 || $Pwork > $fan['p_max']) && !
    $chastotnik){
    continue;
}
```

Далее будем считать, что если абсолютная погрешность найденной величины давления и заданной величины больше 200 Па, то установка нам не подходит. Величина отклонения в 200 Па также является эмпирической.

```
$dros = $Pwork - $airPressureDropFull;
if ($dros < -200 || $dros > 200) {
    continue;
}
```

Все необходимые вычисления сделаны. Осталось сохранить все полученные значения.

Подбор вентилятора с заданными параметрами

```
$calculation_variants[] = array(  
    'commonParams' => array(  
        'recommended' => 1,  
        'airInletLMax' => $airInletLMax,  
        'sectionName' => $fan['vent_name'],  
        'fan' => $fan,  
        'Lwork' => $Lwork,  
        'Pwork' => $Pwork,  
        'd_wheel' => $fan['d_wheel'],  
        'driver' => array(  
            'power' => $fan['NkVt']  
        )  
    )  
);  
  
foreach ($calculation_variants as &$calculation_variant)  
{  
    $calculation_variant['commonParams']['size'] = $size;  
    $calculation_variant['commonParams']['  
        airPressureDropFree'] = $airPressureDropFree;  
    $calculation_variant['commonParams']['  
        airPressureDropFull'] = $airPressureDropFull;  
}
```

Основная функция расчета полностью разобрана. Осталось рассмотреть вспомогательную функцию `fxh`, нужную для решения уравнения методом касательных. Данная функция вычисляет выражение

$$\frac{g_0 + g_1 \cdot xk + g_2 \cdot (xk)^2 + \dots + g_6 \cdot (xk)^6}{k^2} - \frac{p_0}{L_0^2} \cdot x^2,$$

где $g_i, i = 0, 1, \dots, 6$ — коэффициенты многочлена, эмпирически подбираемые для каждого вентилятора, k — отношение максимальной частоты работы вентилятора к стандартной рабочей частоте, p_0 и L_0 — заданные величины расхода воздуха и давления, x — неизвестное значение расхода воздуха, соответствующее точке пересечения характеристики вентилятора и параболы

$$p = \frac{p_0}{L_0^2} \cdot x^2.$$

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

```
function fxx($x) {
    global $globalvar;
    $a = $x * $globalvar['kn'];
    return ($globalvar[0] +
        $globalvar[1] * $x +
        $globalvar[2] * pow($a, 2) +
        $globalvar[3] * pow($a, 3) +
        $globalvar[4] * pow($a, 4) +
        $globalvar[5] * pow($a, 5) +
        $globalvar[6] * pow($a, 6)) / pow($globalvar['kn
        '],2) -
        $globalvar['davlenie'] / pow($globalvar['ldano'],
        2) * pow($x, 2);
}
```

Таким образом, после вычислений массив `$calculation_variants` будет хранить все подходящие установки.

Использование частотного регулирования при подборе вентилятора

В приведенном выше алгоритме подбора вентилятора мы установили допустимые границы для отклонения расхода воздуха и давления. В то же время для установок с большими отклонениями возможно получение заданных показателей путем изменения характеристики вентилятора. Одним из наиболее распространенных методов изменения характеристики является регулирование рабочей частоты вращения вентиляционного колеса. Такой подход зарекомендовал себя как надежный и относительно недорогой. Удорожание суммарной стоимости установки будет соответствовать стоимости частотного регулятора.

Таким образом, для частотного регулирования необходимо подобрать новую частоту, при которой будут получены заданные характеристики установки. На рисунках 3 и 4 изображено изменение характеристики вентилятора путем уменьшения частоты и увеличения частоты соответственно.

Для корректной работы механизма частотного регулирования потребуются незначительные изменения кода, описанного в предыдущем подразделе. В частности, необходимо изменить проверки отклонения расхода воздуха и давления.

Подбор вентилятора с заданными параметрами

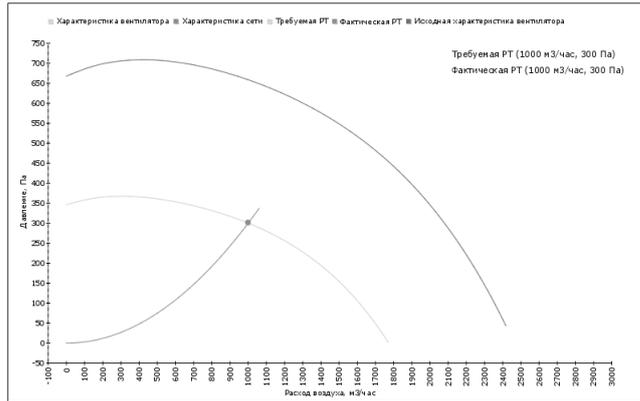


Рис. 3: Частотное регулирование. Случай $n < n_0$.

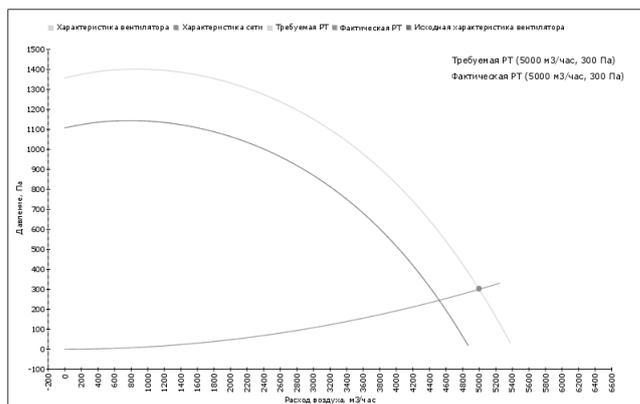


Рис. 4: Частотное регулирование. Случай $n > n_0$.

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

```
$chastotnik = false;
if (($airInletLMax - $x) / $airInletLMax > 0.1) {
    $chastotnik = true;
}
if ($dros < -200 || $dros > 200) {
    $chastotnik = true;
}
```

Теперь, как было указано выше, будем рассматривать характеристику вентилятора как параметрическое уравнение с параметром — частотой вращения рабочего колеса. При фиксированных расходе воздуха и давлении мы получим уравнение относительно параметра. Решим это уравнение тем же методом, который мы уже успешно использовали — методом касательных.

```
$globalvar = array(
    'nmax' => $fan['n_max'],
    'pdano' => $airPressureDropFree,
    'ldano' => $airInletLMax,
    'dpall' => $airPressureDropSum,
    '0' => $fan['x0'],
    '1' => $fan['x1'],
    '2' => $fan['x2'],
    '3' => $fan['x3'],
    '4' => $fan['x4'],
    '5' => $fan['x5'],
    '6' => $fan['x6']
);
$mroot = RootFinding::factory('Secant');
$root = $mroot->compute('chastota', $airInletLMax, 10);
$chastota = $mroot->getRoot();
```

Здесь `chastota` — функция, описывающая уравнение характеристики относительно параметра — частоты. Мы рассмотрим ее далее.

Не забудем добавить проверку найденной частоты на допустимость значения.

```
if ($chastota <= 0 || $chastota > $fan['n_max']){
    continue;
}
```

Считается, что использование частотного регулирования с частотой менее 30 Гц или более 70 Гц неэффективно. Поэтому добавим соответствующую проверку. Для удобства проделаем вычисления без перевода в Герцы.

Подбор вентилятора с заданными параметрами

```
if ($chastota < $fan['n0bAsinhr'] * 0.6 || $chastota >
    $fan['n0bAsinhr'] * 1.4){
    continue;
}
```

Итак, найдена частота, при которой характеристика вентилятора проходит точно через точку (L_0, p_0) .

Рассмотрим теперь функцию *chastota*, нужную для решения уравнения методом касательных. Данная функция вычисляет выражение

$$\frac{g_0 + g_1 \cdot lk + g_2 \cdot (lk)^2 + \dots + g_6 \cdot (lk)^6}{k^2} - p,$$

при этом параметр частоты x используется для вычисления коэффициента k :

$$k = \frac{n_{max}}{x}.$$

```
function chastota($x) {
    global $globalvar;
    $kn=$globalvar['nmax'] / $x;
    $a=$globalvar['ldano'] * $kn;
    return (($globalvar[6] * pow($a,6) + $globalvar[5] *
        pow($a,5) + $globalvar[4] * pow($a,4) + $globalvar
        [3] * pow($a,3) + $globalvar[2] * pow($a,2) +
        $globalvar[1] * $a + $globalvar[0]) / pow($kn,2) -
        $globalvar['pdano'] - $globalvar['dpall']);
}
```

Таким образом, если вычисленное функцией выражение равняется 0, то соответствующий параметр есть искомое значение частоты.

Заключение

В результате был реализован алгоритм подбора вентиляционной установки для заданных параметров — расхода воздуха и давления. Для установок, характеристика которых не позволяет получить подходящие рабочие параметры расхода воздуха и давления, реализована методика использования частотного регулирования с вычислением требуемой частоты.

В. В. Осокин, В. А. Бендик, Т. Р. Сытдыков

Список литературы

- [1] Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования в зданиях. — М.: Евроклимат, 2006.
- [2] Осокин В. В., Алимов Р. Ф., Абдулпотиев А. А. Конфигуратор промышленного вентиляционного оборудования // Интеллектуальные системы. — 2014. — Т. 18, № 4. — С. 145–158.

Selection of the fan with the given parameters

V.V. Osokin, V.A. Bendik, T.R. Sitdikov

In this article we consider the problem of selection of the fan on the set of parameters. The main parameters to be used are air flow and air pressure. For fans, the characteristics of which does not allow to obtain the required flow rate and pressure changes will be considered by adjusting the operating frequency.

Keywords: PHP, industrial ventilation, frequency regulation.