



УДК 633.854

## НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ ПЛОДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Вороновский И.Б. к.т.н.

Назарова О.П. к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

тел. 0632060262; 0672998042, voronovsky@list.ru, nazarova\_10@mail.ru

**Аннотация** – исследованы системы капельного орошения садов и виноградников для различных схем компоновки фильтров, включая последовательное и параллельное соединение фильтров тонкой и грубой очистки, математически обоснована надежность элементов для указанных схем.

**Ключевые слова** – системы капельного орошения, фильтр грубой очистки, фильтр тонкой очистки, надежность, отказ, вероятность безотказной работы, множество состояний, граф состояний.

*Постановка проблемы.* Капельный полив дает хорошие результаты практически во всех отраслях сельского хозяйства, для подавляющего большинства сельскохозяйственных культур. С этим связано и динамичное развитие данного способа орошения. Чтобы понять принципы работы систем капельного полива, необходимо разобраться в их устройстве. Использование методики капельного орошения сформировало новый подход к поливу вообще, а также изменило и подход к выстраиванию цепочки между тремя базовыми составляющими: водой, почвой и растением. Наиболее важный элемент системы капельного полива – фильтрационная станция. Выбор фильтров зависит от состава воды и наличия в ней примесей, а также от орошаемой площади. Многофункциональные стационарные системы орошения призваны использовать принципиально новые технологии проведения комплексных агротехнических мероприятий, которые позволяют своевременно и качественно осуществлять орошение, увлажнение, подкормку и противозаморозковые поливы.

Практика эксплуатации таких систем свидетельствует о том, что эффективность их использования в основном зависит от надежности ее элементов. Поэтому решение задач позволяющих повысить технологическую надежность оросительных систем за счет сохранения чистоты оросительной воды с помощью обоснования компоновочных схем расположения фильтров является актуальным.

*Анализ последних исследований и публикаций.* Вопросам обеспечения чистоты жидкостей с помощью фильтрационных систем посвящено целый ряд научно-исследовательских и опытно конструкторских работ [1, 2, 3].

Однако все эти работы, как правило, направлены на повышение надежности гидравлических и масляных систем мобильной техники, летательных аппаратов, металлорежущих станков и др. В некоторых из этих работ впервые было обращено внимание влияния компоновочных схем включения фильтров на степень очистки жидкости [2, 3, 4].

*Формулировка цели исследования.* Повышение технологической надежности систем капельного орошения садов и виноградников путем обоснования схемных решений компоновки фильтров.

*Основная часть.* На практике встречаются различные варианты схем компоновки фильтров грубой (ФГО) и тонкой очистки (ФТО). Типовая схема такой системы орошения приведена на рис. 1.

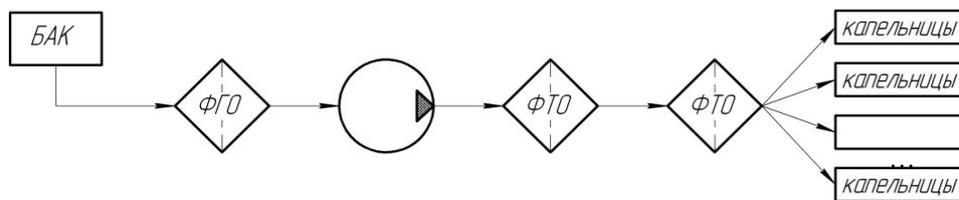


Рис.1. Схемы систем капельного орошения плодовых насаждений с двумя и более ФТО последовательно включенными.

Практика эксплуатации таких систем свидетельствует о том, что эффективность их использования в основном зависит от надежности ее элементов. Схематически такой процесс можно представить графом состояний. Аналогичный подход в оценке надежности подсистем топливной системы МТА использован в работе [2].

Рассматривается вариант – с одним ФГО и двумя и более ФТО последовательно включенными.

Используя теорию графов все эти состояния для каждой из схем компоновки фильтров можно представить в виде отдельного графа состояний рис. 2.

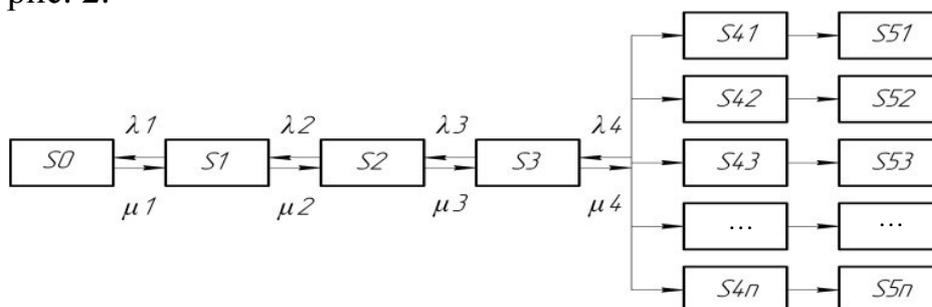


Рис.2. Граф состояния системы капельного орошения для плодовых насаждений.



Для указанного графа состояния системы:

$S_0$  – работоспособное состояние системы капельного орошения,  
 $S_1$  – отказ фильтров установленных на всасывающей магистрали,  
 $S_2$  – отказ ФТО установленных в нагнетательной магистрали,  
 $S_{3н}$ ;  $S_{4н}$  – отказ капельниц.

Работоспособность системы капельного орошения (его состояний) зависит от времени  $t$ . Если воспользоваться понятием теории множеств, то можно рассматривать область работоспособного состояния системы, как такое множество  $E$  состояний определяемых значениями параметров  $x_i$ , при которых отказа нет [5, 6].

В общем виде граф состояния можно представить системой линейных дифференциальных уравнений, описывающим процесс функционирования системы капельного орошения:

$$\frac{dp_i}{dt} = - \sum_{j \in E} \lambda_{i,j} p_i(t) + \sum_{j \in E} \lambda_{j,i} p_j(t)$$

Предполагая, что в момент времени  $t = 0$  система полностью исправна, начальные условия функционирования имеют вид:

$$p_0(0) = 1, \quad p_i(0) = 0, \quad i \in E \setminus \{0\}.$$

Решение системы с заданными начальными условиями позволяет найти вероятность безотказной работы технической системы за время  $t$  при условии, что все состояния отказа являются поглощающимися:

$$P(t) = \sum_{i \in E_+} p_i(t)$$

Для определения среднего времени безотказной работы по графу состояний (рис. 2) составляется система линейных алгебраических уравнений относительно времени пребывания технической системы в исправных состояниях  $\tau_i$ :

$$- \sum_{j \in E} \lambda_{i,j} \tau_i + \sum_{j \in E} \lambda_{j,i} \tau_j = -p_i(0), \quad i \in E_+. \quad (1)$$

Тогда средняя наработка до отказа находится суммированием среднего времени пребывания системы в исправных состояниях:

$$T_1 = \sum_{j \in E_+} \tau_j$$

Суммарный риск системы за время  $t$  находится по формуле:

$$R(t) = - \sum_{i \in E} r_{k(i)} p_i(t)$$

где  $r_{k(i)}$  – риск системы из-за отказа  $i$ -го элемента.

Система решается методом Рунге-Кутты. Для графа состояний с последовательным расположением фильтров (рис. 2), система дифференциальных уравнений имеет вид (1).



Примем, что поток отказов фильтров простейший и время между отказами в этом потоке распределяется по показательному закону и определяется параметрами интенсивности отказов:

$$\lambda = 1/t_{\bar{o}},$$

где  $t_{\bar{o}}$  – среднее время безотказной работы (ФГО – 100 часов, ФТО – 40 часов, капельница – 1000 часов).

По стрелкам вправо систему из состояния в состояние переводят отказы, а по стрелкам влево – ремонты с интенсивностью восстановления:

$$\mu = \frac{1}{t_p}$$

где  $t_p$  – среднее время восстановления исправного состояния путем промывки фильтров и капельницы.

Решение представлено в пакете MathCad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_0}{dt} = -\lambda_1 p_0 + \mu_1 p_1 \\ \frac{dp_1}{dt} = \lambda_1 p_0 - \lambda_2 p_1 + \mu_2 p_2 \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_2 p_1 - \lambda_3 p_2 + \mu_3 p_3 \\ \frac{dp_3}{dt} = \lambda_3 p_2 - \lambda_4 p_3 + \mu_4 (p_{41} + p_{42} + p_{43} + p_{44}) \\ \frac{dp_{41}}{dt} = \lambda_4 p_3 + \mu_{51} p_{51} - \lambda_{51} p_{41} \\ \frac{dp_{42}}{dt} = \lambda_4 p_3 + \mu_{52} p_{52} - \lambda_{52} p_{42} \\ \frac{dp_{43}}{dt} = \lambda_4 p_3 + \mu_{53} p_{54} - \lambda_{53} p_{43} \\ \frac{dp_{44}}{dt} = \lambda_4 p_3 + \mu_{54} p_{54} - \lambda_{54} p_{44} \\ \frac{dp_{51}}{dt} = \lambda_{51} p_{41} \\ \frac{dp_{52}}{dt} = \lambda_{52} p_{42} \\ \frac{dp_{53}}{dt} = \lambda_{53} p_{43} \\ \frac{dp_{54}}{dt} = \lambda_{54} p_{44} \end{array} \right. \quad (2)$$



Матрица уравнений имеет вид:

$$D(t, p) := \begin{bmatrix}
 -\lambda_1 \cdot p_0 + \mu_1 \cdot p_1 \\
 \lambda_1 \cdot p_0 - \lambda_2 \cdot p_1 + p_2 \cdot \mu_2 \\
 \lambda_2 \cdot p_1 - \lambda_3 \cdot p_2 + p_3 \cdot \mu_3 \\
 \lambda_3 \cdot p_2 - \lambda_4 \cdot p_3 + (p_4 + p_5 + p_6 + p_7) \cdot \mu_4 \\
 \lambda_4 \cdot p_3 - \lambda_{51} \cdot p_4 + \mu_{51} \cdot p_4 \\
 \lambda_4 \cdot p_3 - \lambda_{52} \cdot p_5 + \mu_{52} \cdot p_5 \\
 \lambda_4 \cdot p_3 - \lambda_{53} \cdot p_6 + \mu_{53} \cdot p_6 \\
 \lambda_4 \cdot p_3 - \lambda_{54} \cdot p_7 + \mu_{54} \cdot p_7 \\
 \lambda_{51} \cdot p_4 \\
 \lambda_{52} \cdot p_5 \\
 \lambda_{53} \cdot p_6 \\
 \lambda_{54} \cdot p_7 \\
 p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + 1
 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Результаты расчета вероятностей безотказной работы системы капельного орошения  $p_0$  и вероятностей отказов фильтров  $p_{1...11}$  представлены в табл. 1.

Таблица 1. Вероятности безотказной работы системы капельного орошения  $p_0$  и вероятности отказов фильтров  $p_{1...11}$ .

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.07	0.62	0.2	0.18	$2.06 \cdot 10^{-3}$	$5.53 \cdot 10^{-4}$	$5.53 \cdot 10^{-4}$	$5.53 \cdot 10^{-4}$	$5.53 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
2	0.13	0.38	0.19	0.41	0.01	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$7.43 \cdot 10^{-4}$	$7.43 \cdot 10^{-4}$	$7.43 \cdot 10^{-4}$
3	0.2	0.24	0.14	0.59	0.03	$9.83 \cdot 10^{-3}$	$9.83 \cdot 10^{-3}$	$9.83 \cdot 10^{-3}$	$9.83 \cdot 10^{-3}$	$3.72 \cdot 10^{-3}$	$3.72 \cdot 10^{-3}$	$3.72 \cdot 10^{-3}$
4	0.27	0.15	0.09	0.69	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
5	0.33	0.09	0.06	0.75	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
6	0.4	0.06	0.04	0.77	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
7	0.47	0.04	0.02	0.77	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
8	0.53	0.02	0.02	0.76	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.09	0.09
9	0.6	0.01	0.01	0.74	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.12	0.12	0.12
10	0.67	$8.35 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-3}$	0.71	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.15	0.15	0.15
11	0.73	$5.18 \cdot 10^{-3}$	$4.53 \cdot 10^{-3}$	0.68	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.18	0.18	0.18
12	0.8	$3.21 \cdot 10^{-3}$	$3.18 \cdot 10^{-3}$	0.66	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.22	0.22	0.22
13	0.87	$1.99 \cdot 10^{-3}$	$2.33 \cdot 10^{-3}$	0.63	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.25	0.25	...

Расчеты вероятностей состояний для различных схем систем капельного орошения производятся при единых начальных условиях. Подставляя значения интенсивностей  $\lambda$  и  $\mu$ , получим вероятности на-

хождения систем капельного орошения построенных по различным схемам соединения фильтров (рис. 3), в исправном состоянии  $p_0$  и вероятности выхода из строя фильтров  $p_{1...11}$  за сезон.

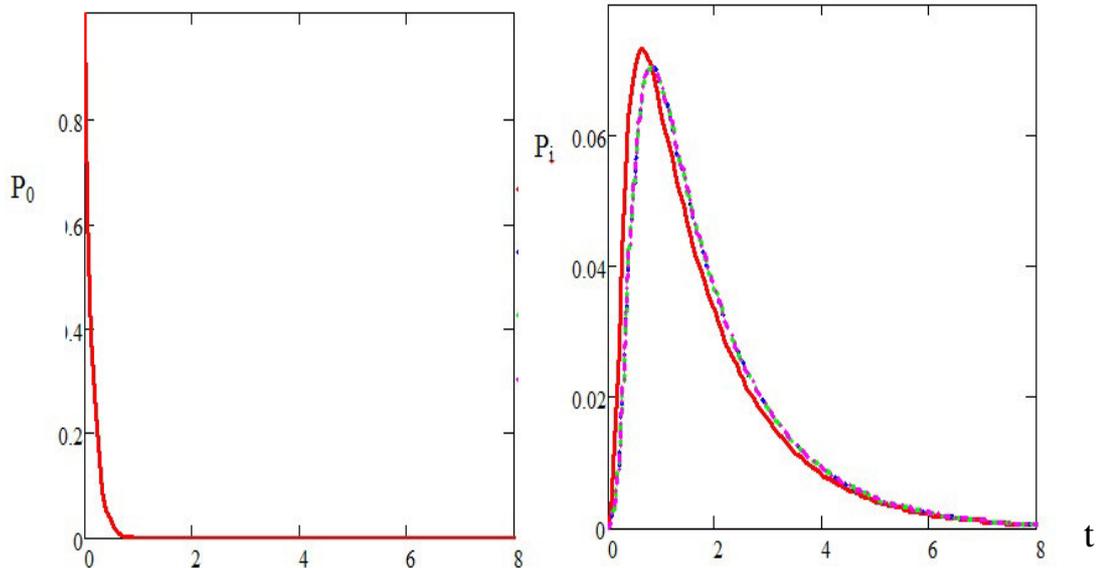


Рис. 3. Вероятности состояний переходного процесса.

Анализ позволяет констатировать: максимальной вероятностью нахождения фильтров в исправном состоянии обладает система с последовательным соединением фильтров, ( $p_0=0,945$ ). Увеличение количества фильтров тонкой очистки и включение их в схему капельного орошения параллельно, не увеличивает вероятности безотказной работы системы, такой путь является мало эффективным. Максимальную вероятность отказа из всех фильтров имеет ФГО, особенно при параллельном соединении фильтров тонкой очистки ( $p_1=0,175$ ), а затем, на порядок меньше, фильтры тонкой очистки.

Исходя из полученных теоретических данных, можно сделать вывод, что наиболее эффективной системой соединения фильтров следует считать последовательное соединение, состоящее из фильтра грубой очистки и двух фильтров тонкой очистки. При этом необходимо разработать мероприятия по повышению эффективности работы фильтра грубой очистки, увеличив его фильтрующие свойства. Такие мероприятия позволят уменьшить вероятность отказа фильтров тонкой очистки, обеспечив их надежную работу.

*Выводы.* Установлено, что наиболее эффективным с точки зрения обеспечения технологической надежности систем капельного орошения, является последовательное включение фильтра грубой очистки и двух фильтров тонкой очистки.

В результате проведенных исследований и представленных схем функционирования системы, можно сделать вывод относительно ме-



роприятий по восстановлению отказавших элементов схемы, оптимизировать работу системы, прогнозировать работу отдельных блоков систем капельного орошения садов и виноградников.

*Литература.*

1. Кондратов В.В. К вопросу о выборе схемы системы фильтрации дизельного топлива тракторных двигателей / В.В. Кондратов / – Труды ЦНИТА, 1963 – № 18. – С. 60 – 65.

2. Вороновский И.Б. Повышение эффективности эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в условиях запыленности воздуха технологической средой. / И.Б. Вороновский / Автореф. дис. канд. техн. наук. – Мелитополь, 2011. – 21 с.

3. Никитин Г.А. Проблемы чистоты жидкостей топливных, масляных и гидравлических систем. / Г.А. Никитин / – К.: Знание, 1978. – 18 с.

4. Рыбаков К.В. Повышение чистоты нефтепродуктов / К.В. Рыбаков, Т.Н. Корпенкина / – М.: Агропромиздат, 1986 – 112 с.

5. Половко А.М. Основы теории надежности. / А.М. Половко, С.В. Гуров / Практикум. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 560 с.

6. Венуель Е.С. Исследование операций. / Е.С. Венуель – М.: Советское радио, 1972 – 552 с.

## НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ КРАПЛИННОГО ЗРОШУВАННЯ ПЛОДОВИХ НАСАДЖЕНЬ

Вороновський І.Б., Назарова О.П.

**Анотація** – досліджені системи краплинного зрошування садів і виноградників для різних схем компоновки фільтрів, включаючи послідовне і паралельне з'єднання фільтрів тонкого і грубого очищення, математично обґрунтована надійність елементів для вказаних схем.

## RELIABILITY OF SYSTEMS OF TINY IRRIGATION OF FRUIT PLANTING

I. Voronovskiy, O. Nazarova

### *Summary*

**Developed and investigational mathematical models of reliability of the systems of tiny irrigation of gardens and vineyards for the different charts of arrangement of filters, including successive and parallel connection of filters of the thin and rough cleaning.**