

УДК 628.162:004.896

СВИНАРЧУК Е.А., студентка ТБ-11М (НИУ МИЭТ)
Научный руководитель **ПОПОВА Н.В.**, к.т.н. (НИУ МИЭТ)
г. Зеленоград

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЦИКЛИНГА ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Микроэлектронная промышленность является одним из наиболее ресурсоемких секторов современной экономики. На фоне прогнозируемого роста глобального рынка полупроводников и увеличения производственных мощностей (строительство новых «фабрик» находится на рекордном уровне) экологическая нагрузка от отрасли становится важным фактором ее развития [1]. Процесс производства микросхем требует исключительно больших объемов сверхчистой воды – специально подготовленной деионизованной воды с удельным электрическим сопротивлением до 18,2 МОм·см. Согласно данным, опубликованным в академической литературе, типовое полупроводниковое производство потребляет от 3 000 до 60 000 м³ сверхчистой воды в сутки в зависимости от масштаба и технологического процесса [2].

Получение деионизованной воды – энергоемкий и дорогостоящий процесс, включающий многоступенчатую очистку. Согласно отраслевым оценкам, глобальный рынок сверхчистой воды в 2024 году оценивался в сотни миллиардов долларов, а к 2031 году, по прогнозам, вырастет почти вдвое, чему способствует в первую очередь спрос со стороны производителей полупроводников [3, 4]. В этих условиях вода становится одновременно технологическим ресурсом, фактором экономической эффективности и экологической ответственности.

На российских микроэлектронных предприятиях традиционно сложилась линейная модель водопользования: артезианская вода доводится до состояния деионизованной, применяется на различных операциях (промывка кремниевых пластин, фотолитография, химико-механическая планаризация и др.), после чего даже относительно чистые стоки смешиваются с более загрязненными и направляются на нейтрализацию и сброс.

С точки зрения бережливого производства, это создает два вида потерь: перепроизводство (очистка воды до высших стандартов для всех операций без учета реальной потребности) и потерю ресурса (вода после финишной промывки, загрязненная, но пригодная для менее требовательных операций, уходит в сток вместо возврата в технологический цикл).

Внедрение замкнутых водооборотных циклов и каскадных схем водопользования соответствует глобальному тренду на цикличную экономику, предполагающему сохранение ценности ресурсов на всех этапах производственного цикла [5]. В России экономика замкнутого цикла обрела статус одной из стратегических инициатив Правительства до 2030 г., а в 2022 году был утвержден соответствующий федеральный проект [6, 7]. Хотя основное

внимание данных документов уделено обращению с отходами производства и потребления, заложенные в них принципы и подходы формируют благоприятную нормативно-правовую среду для внедрения ресурсосберегающих решений, включая рециклинг технологической воды в микроэлектронном производстве.

Целью данного исследования является разработка предложений по модернизации участка промышленных стоков предприятия микроэлектронной промышленности (многостадийная промывка кремниевых пластин с использованием деионизованной воды, среднесуточное потребление – 1443 м³) с организацией замкнутого цикла использования воды последней промывки на основе интеллектуальной системы контроля качества.

Задачи исследования:

- 1) обосновать возможность повторного использования воды после последней промывки по результатам анализа её качества;
- 2) разработать предложения по модернизации участка промышленных стоков с организацией замкнутого цикла;
- 3) выполнить оценку экономической и экологической эффективности предлагаемых решений.

В ходе работы были проведены замеры качества воды, поступающей после последней (финишной) промывки кремниевых пластин. Измерения выполнялись с помощью следующих приборов:

- удельное электрическое сопротивление – портативный кондуктометр-солемер HANNA HI 98308 (диапазон измерения 0–20 МОм·см, погрешность $\pm 2\%$);
- мутность – портативный турбидиметр HANNA HI 98703 (диапазон 0–1000 ВВм, погрешность $\pm 2\%$ от измеряемой величины).

Измерения проводились в течение 10 рабочих дней, по 3 замера в смену. Результаты показали, что вода характеризуется стабильно высокими показателями:

- удельное электрическое сопротивление достигает 18,2 МОм·см;
- содержание взвешенных частиц не превышает 7 единиц мутности (ВВм).

Данные параметры соответствуют требованиям, предъявляемым к деионизованной воде, используемой в основном производстве. Таким образом, обоснована возможность возврата данной воды в технологический цикл для использования на операциях с менее жесткими требованиями (первая промывка, приготовление технических растворов, охлаждение оборудования) без дополнительной очистки до уровня исходной деионизованной воды.

В существующей схеме сбора стоков все потоки объединяются и направляются на линию нейтрализации. При таком подходе вода, пригодная для повторного использования, подвергается химической обработке, что приводит к неоправданным затратам реагентов и дополнительной нагрузке на очистные сооружения. Кроме того, увеличение объема стоков требует пропорционального увеличения потребления свежей деионизованной воды для обеспечения производственных нужд. Для решения этих проблем разработаны следующие предложения по модернизации участка промышленных стоков:

- 1) реконструкция трубопроводов – разделение потоков с установкой интеллектуального узла управления на выходе баков сбора воды после последней промывки;
- 2) мультипараметрический контроль – на выходе баков устанавливается мультипараметрический датчик для непрерывного мониторинга удельного сопротивления (целевое значение 18,2 МОм·см) и мутности (пороговое значение не более 7 ВВм);
- 3) автоматическое переключение потоков – сигнал с датчика поступает на программируемый логический контроллер, который реализует алгоритм сравнения текущих значений с пороговыми.

При соответствии воды требованиям трехходовой клапан направляет поток в резервуар накопления для возврата в технологический цикл; при несоответствии – на линию нейтрализации. Для исключения ложных срабатываний в алгоритм управления закладывается гистерезис – зона нечувствительности. Например, если порог мутности установлен на уровне 7 ВВм, то переключение клапана в положение «на очистку» происходит при превышении 7,5 ВВм, а обратное переключение – только после снижения мутности ниже 6,5 ВВм. Это предотвращает многократное переключение клапана при колебаниях параметров около порогового значения.

Модуль предиктивной аналитики на основе ИИ – в отличие от стандартных систем автоматического переключения, в рамках настоящей работы предлагается концепция внедрения модуля предиктивной аналитики на базе алгоритмов машинного обучения (Random Forest или Multilayer Perceptron). На данном этапе разработана архитектура модуля и определен перечень его планируемых функций.

Планируется, что ИИ-модуль будет непрерывно анализировать массив данных, поступающих с мультипараметрического датчика. В отличие от простого логического контроллера, который реагирует на достижение пороговых значений в режиме реального времени, ИИ-модуль должен выявлять скрытые закономерности:

- временные тренды – изменение показателей сопротивления и мутности в течение производственной смены в зависимости от интенсивности промывки пластин;
- циклические зависимости – корреляцию между качеством воды и временными факторами (день недели, номер смены, дата месяца).

В проектируемой прогнозной модели предполагается учитывать следующие входные параметры:

- текущие технологические: динамика изменения сопротивления и мутности за последние 2-4 часа, скорость изменения параметров;
- режимные: интенсивность промывки, количество обработанных пластин, цикличность замены фильтров;
- календарные: день недели, дата месяца, приближение к плановому техническому обслуживанию.

В качестве результатов работы ИИ-модуля планируется получение следующих прогнозов:

1) краткосрочный прогноз (ближайшие 2-4 часа). Система должна предупреждать оператора или вышестоящую АСУ ТП о том, что в течение ближайшего времени качество воды может выйти за допустимые пределы. Это позволит принимать упреждающие меры (скорректировать режим промывки, снизить интенсивность обработки пластин, инициировать дополнительную фильтрацию) до того, как некондиционная вода будет направлена в накопительный бак;

2) долгосрочный прогноз (на уровне дня и даты месяца). На основе анализа накопленных исторических данных ИИ-модуль должен формировать отчетность, указывающую на дни и даты месяца, в которые с наибольшей вероятностью происходит превышение показателей. Такое прогнозирование позволит:

- оптимизировать график планово-предупредительных ремонтов (ППР), приурочивая техническое обслуживание узлов водоподготовки и промывочных установок к «критическим» периодам;

- планировать повышенное внимание операторского персонала к участку в прогнозируемые «рисковые» дни;

- выявлять системные проблемы (ухудшение качества исходной воды в определенные дни месяца, связанное с работой сторонних поставщиков или городских сетей);

- осуществлять проактивное управление запасами расходных материалов (фильтры, реагенты), пополняя складские запасы перед наступлением прогнозируемых «критических» периодов;

- формировать обоснованные корректирующие мероприятия по результатам анализа долгосрочных трендов.

Для количественной оценки экономической и экологической эффективности предлагаемых решений выполнен расчет ожидаемых результатов внедрения.

Предприятие работает в непрерывном режиме 24/7. Согласно данным технологического регламента и оперативного учета, среднесуточное потребление сверхчистой деионизованной воды составляет 1443 м³, а объем стоков после финишной промывки, пригодных для возврата в технологический цикл, соответствует 20% от общего потребления.

Таким образом, ежедневно на операции с менее жесткими требованиями (первая промывка, приготовление технических растворов, охлаждение оборудования) может направляться 288,6 м³ воды без дополнительной очистки до уровня исходной деионизованной воды. В годовом исчислении с учетом круглосуточной работы экономия водоподготовки достигает 105 339 м³.

По данным технико-экономического отдела предприятия, фактическая стоимость приготовления 1 м³ деионизованной воды (включая электроэнергию, реагенты, обслуживание) составляет 280 руб./м³. В расчете использован расширенный диапазон 200–400 руб./м³ для учета возможной вариативности цен. При этом прямой экономический эффект от снижения водопотребления оценивается в диапазоне от 21 до 42 млн руб. в год.

Дополнительный экономический эффект достигается за счет снижения расхода реагентов (кислота, щелочь) на линии нейтрализации, уменьшения нагрузки на насосное оборудование (что позволяет продлить его ресурс), а также сокращения трудозатрат операторского персонала на контроль и управление участком стоков.

Капитальные затраты на модернизацию включают приобретение и монтаж мультипараметрического датчика (кондуктометр и турбидиметр), программируемого логического контроллера, трехходового клапана с приводом, а также затраты на пусконаладочные работы и программное обеспечение для модуля предиктивной аналитики. Общая сумма капитальных затрат оценивается в 2,5–3,0 млн руб.

Расчетный срок окупаемости проекта составляет менее двух месяцев, что позволяет квалифицировать инвестиции как высокоэффективные.

Экологический эффект от внедрения выражается в сокращении забора артезианской воды на 105 339 м³ в год, уменьшении объема стоков, направляемых на нейтрализацию, снижении нагрузки на очистные сооружения, а также в уменьшении потребления реагентов для химической обработки.

С точки зрения концепции бережливого производства предлагаемое решение позволяет устранить потери, связанные с нерациональным использованием ресурсов (возврат пригодной воды вместо ее сброса), сократить время цикла за счет автоматизации процесса принятия решений, повысить качество управления технологическим процессом за счет непрерывного мониторинга и прогнозирования, а также вовлечь операторов в процесс непрерывных улучшений за счет освобождения времени для выполнения более сложных задач.

Предложенное решение может быть внедрено на других предприятиях микроэлектронной промышленности, использующих многоступенчатую промывку продукции, и рекомендовано к внедрению в рамках программ повышения производительности труда и экологической безопасности.

Список литературы:

1. IDTechEx. Sustainable Electronics and Semiconductor Manufacturing 2025–2035: Players, Markets, Forecasts : report / IDTechEx ; analyst T. Bithell. — 2025. — 350 p. — URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/sustainable-electronics-and-semiconductor-manufacturing-2025/1065> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.
2. Ismail, A. F. Reverse Osmosis / A. F. Ismail, K. C. Khulbe, T. Matsuura. — Amsterdam : Elsevier, 2019. — 290 p.
3. 6Wresearch. Global Ultra Pure Water Market (2025–2031): Trends, Outlook & Forecast : report / 6Wresearch ; B. Singh. — 2025. — 190 p. — URL: <https://www.6wresearch.com/industry-report/global-ultra-pure-water-market> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.
4. QYResearch. Ultra Pure Water (UPW) for Semiconductor Manufacturing — Global Market Share and Ranking, Overall Sales and Demand Forecast 2025–2031 :

report / QYResearch. — 2025. — 124 p. — URL: <https://www.qyresearch.com/reports/3428706/ultra-pure-water--upw--for-semiconductor-manufacturing> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.

5. Khajuria, A. Circular economy education approaches to water use in the industrial sector / A. Khajuria, R. Ravindranath // *Frontiers in Environmental Science*. — 2025. — Vol. 13. — P. 1635079. — DOI: 10.3389/fenvs.2025.1635079. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2025.1635079/full> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.

6. Распоряжение Правительства РФ от 06.10.2021 № 2816 р «Об утверждении перечня инициатив социально экономического развития Российской Федерации до 2030 года» (ред. от 06.10.2025). — URL: <http://government.ru/news/43451/> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.

7. Паспорт федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» : утв. протоколом президиума Правительственной комиссии по вопросам социально экономического развития РФ от 15.02.2022 № 1. — URL: <http://government.ru/news/44337/> (дата обращения: 10.04.2026). — Текст: электронный.